

S108

ANNALES

# DES MINES

ÉCOLE NATIONALE DES MINES
Entrée
BIBLIOTHÈQUE
bis
1 2

Les Annales des Mines sont publiées sous les auspices de l'Administration des Mines et sous la direction d'une Commission spéciale, nommée par le Ministre des Travaux publics. Cette Commission, dont font partie le directeur des routes, de la navigation et des mines et le directeur du personnel et de la comptabilité, est composée ainsi qu'il suit :


MM.

Linder, inspecteur gén. des mines, *président.*
Haton de la Goupillière, insp. gén., direct. de l'Ecole sup. des mines.
Orsel, inspecteur général.
Résal, inspecteur gén., professeur à l'Ecole supérieure des mines.
Lorieux, inspecteur général.
Villot, d°
Peslin, d°
Vicaire, inspect. gén., professeur à l'Ecole supérieure des mines.
Carnot, insp. gén., inspecteur de l'Ecole supérieure des mines.
Aguillon, insp. gén., professeur à l'Ecole supérieure des mines.
Keller, insp. gén., secrétaire de la Commission de la statistique de l'industrie minérale.

MM.

Worms de Romilly, inspecteur général.
Cheysson, insp. gén. des ponts et chaussées, professeur à l'Ecole supérieure des mines.
Potier, ingénieur en chef, prof. à l'Ecole supérieure des mines.
Ledoux, d°
Douvillé, d°
Bertrand, d°
Le Chatelier, d°
Lodin, d°
Sauvage, ing. des mines, profes. à l'Ecole supérieure des mines.
Termier, d°
De Launay, d°
Zeiller, ingénieur en chef, *secrétaire de la Commission.*


L'Administration a réservé un certain nombre d'exemplaires des Annales des Mines pour être envoyés soit, à titre de don, aux principaux établissements nationaux et étrangers consacrés aux sciences et à l'art des mines, soit à titre d'échange, aux rédacteurs des ouvrages périodiques, français et étrangers, relatifs aux sciences et aux arts.

Les lettres et documents concernant les Annales des Mines doivent être adressés, *sous le couvert de M. le Ministre des Travaux publics*, à M. l'ingénieur en chef, secrétaire de la Commission des Annales des Mines.

Les auteurs reçoivent *gratis* 20 exemplaires de leurs articles.

Ils peuvent faire faire des tirages à part, à raison de 9 francs par feuille jusqu'à 50, 10 francs de 50 à 100, et 5 francs en plus pour chaque centaine ou fraction de centaine à partir de la seconde. — Le tirage à part des planches est payé 10 francs par planche et par cent exemplaires ou fraction de centaine. Les planches extraordinaires sont payées au prix de revient.

Le brochage, y compris couverture imprimée et faux frais, est payé, pour une feuille seule ou une fraction de feuille, 3 francs le premier cent et 1f,25 pour chaque centaine ou fraction de centaine en plus. Pour chaque planche, ou chaque nouvelle feuille de texte, il sera payé 0f,25 par chaque centaine d'exemplaires.

La publication des Annales des Mines a lieu par livraisons, qui paraissent tous les mois.

Les douze livraisons annuelles forment trois volumes, dont deux consacrés aux matières scientifiques et techniques, et un consacré aux actes administratifs et à la jurisprudence. Ils contiennent ensemble 120 feuilles d'impression et 24 planches gravées environ.

Le prix de l'abonnement est de 20 francs pour Paris, de 24 francs pour les départements et de 28 francs pour l'Etranger.


Tours. — Imprimerie Deslis Frères.


# ANNALES
# DES MINES
OU
# RECUEIL
## DE MÉMOIRES SUR L'EXPLOITATION DES MINES
ET SUR LES SCIENCES ET LES ARTS QUI S'Y RATTACHENT

PUBLIÉES

SOUS L'AUTORISATION DU MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS.


ÉCOLE NATIONALE DES MINES
Entrée
BIBLIOTHÈQUE
1 bis
2


**NEUVIÈME SÉRIE**

MÉMOIRES. — TOME X.


PARIS

Vve Ch. DUNOD et P. VICQ, ÉDITEURS

LIBRAIRES DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES

**Quai des Grands-Augustins, 49**

1896

ECOLE NATIONALE DES MINES
Entrée
BIBLIOTHÈQUE
Lots
12

ANNALES
DES MINES

# APPLICATIONS GÉOLOGIQUES DE LA SPÉLÉOLOGIE

## ORIGINE ET ROLE DES CAVERNES
## LEURS VARIATIONS CLIMATÉRIQUES
## LEURS RAPPORTS AVEC LES FILONS

Par E.-A. MARTEL.

*Premières études relatives aux cavernes.* — La connaissance et l'étude des *cavités naturelles du sol* présentent un intérêt de premier ordre pour les géologues, les ingénieurs et les hydrologues. Les rapports intimes des puits naturels (abîmes) et des cavernes avec les sources, les eaux souterraines, les dislocations de la croûte terrestre, les filons métallifères, les dépôts d'ossements fossiles, etc., sont les éléments constitutifs de cet intérêt. Depuis moins d'un siècle seulement, on l'a scientifiquement reconnu. Le *Mundus subterraneus* du P. Kircher (*) ne renferme guère, en matière de grottes, que fables et fantaisies; et le grand ouvrage du Baron de Valvasor, *Die Ehre des Herzogthums Krain* (**), quoique fourni de curieux renseignements, dit de la plupart des cavernes et

(*) Amsterdam, 2 vol. in-folio, 1665 et 1678.
(**) Laibach et Nuremberg, 1689; 2e édition à Rudolfswerth, en 1877.

rivières souterraines, dont il esquisse la description en Carniole, que nul homme encore n'en a vu les extrémités.

Vers 1780 ou 1785, Carnus remontait du gouffre du Tindoul de la Vayssière (Aveyron), en prétendant qu'il avait « remarqué sur des pierres quelques légères incrustations de soufre et de bitume, et quelques petites veines métalliques dans des cailloux »; de plus, il niait l'existence de la rivière souterraine qu'on y supposait (*) et que MM. Quintin et Coste y ont trouvée effectivement en 1890.

Le XVIII^e^ siècle produisit, notamment en Allemagne et en Autriche, quelques ouvrages relatifs aux curiosités du monde souterrain; de 1801 à 1806, parut à Hambourg la *Beschreibung der grösszten und merkwürdigsten Höhlen des Erdbodens*, en trois volumes, par Ch.-W. Ritter.

Les premières œuvres essentiellement scientifiques (**) consacrées aux cavernes furent en réalité : pour la paléontologie, les Recherches sur les ossements fossiles, de Cuvier (1821-1823, Fouvent, Gaylenreuth, etc.), les *Reliquiæ diluvianæ* de Buckland (1823), et les Recherches sur les ossements fossiles des cavernes de la province de Liège, de Schmerling (Liège, 1833-1834); — pour l'hydrologie et la géologie, les deux courtes, mais importantes brochures de M. Parandier (Notice sur les causes de l'existence des cavernes; *Acad. des sciences et arts de Besançon*, 28 janvier 1833) et de Virlet d'Aoust (Des cavernes, de leur origine et de leur mode de formation, feuilleton de l'*Observateur d'Avesnes*, 1836), la notice d'Arago sur les Puits artésiens (*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1835), et l'Essai sur le remplissage des cavernes à

(*) Bosc, Mémoires pour servir à l'histoire du Rouergue. In-8°, an V.

(**) Auxquelles Cuvier avait préludé par son mémoire sur les têtes d'ours fossiles des cavernes de Gaylenreuth (*Bulletin de la Société philomathique*, Paris, 1796).



ossements (Harlem, 1835, etc.), par Marcel de Serres.

On sait quelle véritable fièvre de fouilles s'est emparée d'une foule de chercheurs, souvent plus curieux qu'expérimentés, quand Boucher de Perthes eut créé la *préhistoire*. Dès lors la littérature relative aux cavernes s'accroît considérablement : mais la préoccupation dominante est celle de la paléontologie et de la paléthnologie; c'est elle seulement qui a conduit M. Ollier de Marichard, il y a déjà une trentaine d'années, au fond de gouffres ardéchois creux de plus de 50 mètres.

Les questions relatives à la géologie, à l'hydrologie, à l'origine et au fonctionnement des cavernes ne sont guère abordées avec quelque détail que dans les livres ou mémoires suivants :

Abbé Paramelle, l'Art de découvrir les sources, 1856; Fournet, Hydrographie souterraine (*Académie des sciences de Lyon*), 1858; — Desnoyers, article Grottes, du *Dictionnaire d'histoire naturelle* de d'Orbigny, 1845 et 1868 (*); — Schmidl, Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, etc., Vienne, 1854; — Fuhlrott, Die Grotten von Rheinland, Westphalen, Iserlohn, 1869; — Comte Wurmbrand, Ueber die Grotten... bei Peggau, Graz, 1871; — Tietze, *passim*, dans *Jahrbuch der œster. Geologisch. Reichsanstalt*, 1873 à 1891, *passim*; — Boyd-Dawkins, Cave Hunting, Londres, 1874; — Mojsisovics, Karst-Erscheinungen (*Club alpin autrichien-allemand*), 1880; — Packard, Cave-Fauna of North America, 1881; — Lucante, Essai géographique sur les cavernes de France et de l'étranger, malheureusement inachevé, dans *Bulletin de la société d'études scientifiques d'Angers*, 1880 et 1882; — Hovey, Celebrated american caverns, Cincinnati, 1882; — Szombathy, Die Höhlen und ihre Erforschung (*Jahrb. des Ver. zur Verbreitung naturwissenchaftl. Kenntnisse*), Vienne, 1883; — Fruwirth, Ueber Höhlen, (*Club alpin autrichien-allemand*), 1883 et 1885; etc.

Ensuite toutes les connaissances acquises, tous les faits

(*) T. VI de la 2^e^ édition (1868), p. 646 à 755, assurément le plus sérieux et complet travail d'ensemble sur les cavernes qu'on ait publié en France avant les récentes recherches. Il reste plein d'utiles documents pour les futures explorations.

constatés en dehors de la préhistoire et de la paléontologie furent magistralement résumés par le grand ouvrage du regretté M. Daubrée, les Eaux souterraines à l'époque actuelle et aux époques anciennes (1887 et 1888), qui a définitivement arrêté les grandes lignes de la science physique des cavernes.

Mais, au moment même où se rédigeait ce travail capital, les explorations souterraines recevaient, en Autriche et en France, deux pays privilégiés quant au creusement de leur sous-sol, une impulsion inattendue, un développement considérable.

*Extension récente des explorations souterraines.* — D'abord les Autrichiens, principalement à l'instigation de M. Kraus, reprenaient partout, vers 1880, les investigations souterraines un peu délaissées depuis les belles découvertes d'Adolf Schmidl (1850-1856) ; une société d'étude des cavernes (*Verein für Höhlenkunde*) essayait de se fonder en 1879-1880, mais ne trouvait de vitalité que de 1882 à 1888, comme section (*für Höhlenkunde*) du Club des Touristes autrichiens; en 1886, le gouvernement d'Autriche-Hongrie lui-même et diverses autorités provinciales faisaient entreprendre les explorations et travaux officiels, principalement hydrologiques, de MM. Putick, Hrasky, Riedel, Ballif, qui ne sont pas encore terminés, en Istrie, en Carniole, en Bosnie et Herzégovine ; depuis 1883, MM. Hanke, Marinitsch, Müller, Novak, autour de Trieste, et MM. Kriz, Trampler, Szombathy, Fugger, Siegmeth en Moravie, Hongrie, etc., accomplissaient une série de trouvailles réellement géographiques, qu'ils poursuivent toujours.

En France, en 1888, avec le concours de M. G. Gaupillat, ancien élève de l'École polytechnique, j'inaugurai l'application du téléphone et des bateaux démontables en toile, à l'exploration des abîmes profonds de 100 mètres



et plus, et des rivières souterraines, objets de tant de terreurs et de tant de fausses légendes. Les abîmes surtout n'avaient jusqu'alors été affrontés qu'en très petit nombre, et seulement ceux que le jour éclairait bien : la Mazocha (Moravie, 136 mètres, dont 50 à pic), par Nagel, en 1748 ; Elden Hole (Derbyshire, 80 mètres), par Lloyd, en 1770; le Tindoul (Aveyron, 60 mètres), par Carnus, vers 1780 ou 1785; Allum-Pot (Yorkshire, 90 mètres) par Birkbeck et Metcalfe, en 1847 et 1848; Piuka-Jama (Carniole, 65 mètres), par Schmidl, en 1852 ; l'exploration du fameux puits de Trébič (Istrie, 322 mètres) par Lindner, en 1840-1841, fut un vrai travail d'ingénieur qui dura onze mois.

Depuis huit ans, j'ai consacré presque tous mes loisirs et toutes mes ressources à ces pénétrations profondes et lointaines dans une foule de cavités inconnues, étendant mes recherches avec le concours de nombreux collaborateurs, et en exécution de missions scientifiques confiées par le Ministère de l'Instruction Publique, non seulement aux diverses régions caverneuses de la France, mais encore à la Belgique, au Karst autrichien, à la Grèce, à l'Angleterre et à l'Irlande.

Cette sorte de renaissance, en partie double, des études souterraines d'ordre physique a, en dix ans, non pas bouleversé les notions déjà acquises, mais confirmé pratiquement la justesse de belles théories géologiques, fait justice de certaines hypothèses inexactes, quoique fort séduisantes, mis fin à bien des controverses, en un mot fixé davantage les idées sur les phénomènes intérieurs de la partie supérieure de l'écorce terrestre. Elle a surtout révélé l'existence d'une quantité d'antres divers, utiles à connaître à plus d'un titre.

Le tableau des nouvelles données ainsi recueillies a été sans délai exposé par trois récents ouvrages, parus presque simultanément, et mettant au point l'état actuel

de la *Höhlenkunde*. La *Höhlenkunde* est la science des cavernes qui, sous le nom générique de *spéléologie* (*), cherche maintenant à revendiquer une petite place à part dans la série des sciences naturelles. Les trois ouvrages en question sont :

J. Cvijić, Das Karst-Phänomen, 3e cahier du tome V des *Geographische Abhandlungen* de Penck; Vienne, Hölzel; in-8°, 1893, 114 pages et figures; — E.-A. Martel, Les Abîmes, explorations de 1888 à 1893; in-4°, 580 pages, 320 plans et gravures; Paris, Delagrave, 1894; — F. Kraus, Höhlenkunde, manuel des explorations souterraines; in-8°, 308 pages, 161 plans et gravures; Vienne, Gerold, 1894 (**).

Depuis leur apparition, j'ai continué mes recherches : une heureuse campagne en Angleterre et en Irlande (juillet-août 1895), qui a complètement fixé mes idées sur divers points douteux, et une étude d'hiver (mars-avril 1896), dans plusieurs grandes cavernes des Causses m'ont même livré assez d'indications neuves pour que je puisse ici présenter aujourd'hui un travail inédit, que je diviserai en trois parties (***) :

Ire partie. — Origine et rôle des cavités naturelles ;

IIe partie. — Variations climatériques dans les cavernes ;

IIIe partie. — Cavernes du Peak (Derbyshire) et leurs rapports avec les filons métallifères.

---

(*) Une Société *internationale* de spéléologie s'est fondée à Paris, à la fin de 1894 ; elle compte actuellement 220 membres et publie un *Bulletin* (*Spelunca*) et des *Mémoires*.

(**) Il faut citer encore les recherches géologiques toutes nouvelles de MM. Gümbel, Ranke, Zittel, Nehring, Kloos, Blasius, Schwalbe, Endriss, etc., dans les cavernes de l'Allemagne, et la récente fondation du *Schwäbischer Höhlen-Verein* à Gutenberg, en Würtemberg.

(***) Je ne le surchargerai pas de notes bibliographiques détaillées ; les spécialistes les trouveront aussi abondantes et aussi complètes que possible dans les trois ouvrages ci-dessus indiqués.



# PREMIÈRE PARTIE.

## ORIGINE ET RÔLE DES CAVITÉS SOUTERRAINES.

*Terrains caverneux.* — Les cavités naturelles du sol ne se rencontrent *en principe* que dans les formations géologiques compactes, mais fissurées. Les terrains meubles, poreux, de transport, tels que les sables, graviers, scories, moraines, etc., peuvent être considérés comme non caverneux. L'incohérence de leurs éléments empêche les larges vides, sinon de s'y former, du moins de s'y maintenir.

Origine des cavernes. — *Joints et lithoclases.* — Les principales causes de la formation des cavités naturelles sont au nombre de deux : la préexistence des fissures des roches et le travail des eaux d'infiltration.

Il conviendrait, surtout au point de vue de l'origine des cavernes, de bien distinguer deux sortes de fissures dans les roches : les *lithoclases* et les *joints*. Ce dernier terme, en effet, a donné lieu, chez les architectes, comme chez les géologues qui le leur ont emprunté, aux définitions les plus contradictoires (*) et à une gênante confusion entre les *plans* de stratification et les autres fissures.

---

(*) Pour Quatremère de Quincy (Dictionnaire d'Architecture) et Larousse (Grand Dictionnaire), les joints sont, en général, les *intervalles qui séparent les pierres*, les *fissures naturelles qui traversent les roches*, quel qu'en soit le sens.

Viollet-le-Duc (Dictionnaire d'Architecture) et la Grande Encyclopédie réservent le nom de joints aux faces par lesquelles les pierres « sont contiguës latéralement » et appellent tout spécialement *lits* leurs plans de « séparation horizontaux ».

D'autres, dont l'opinion est adoptée aussi par le Dictionnaire de Larousse, emploient les termes de *joints de lit* pour les joints horizontaux et *joints montants* pour les joints verticaux.

En géologie, même confusion :

Arago d'abord a écrit que les terrains tertiaires sont stratifiés,

La nécessité de bien distinguer les plans de stratification des fentes qui traversent les bancs, saute aux yeux dans des cavernes comme Bramabiau, Adelsberg, Padirac, etc. Très généralement, en effet, il s'est formé entre les strates « des galeries basses ou tunnels, où la largeur l'emporte sur la hauteur, et dans les diaclases des allées longues, étroites et élevées » (Abîmes, p. 196).

Bien plus, il y a des cavernes (comme la Recca de Saint-Canzian par exemple) et surtout des abîmes, creusés aux

c'est-à-dire composés de couches superposées et séparées à la manière des *assises* d'un mur par des *joints* nets et bien tranchés (Notice sur les puits artésiens, *Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1835, p. 203). Pour lui, les joints semblent bien être les *plans de stratification*.

Le géologue irlandais Kinahan distingue dans les roches stratifiées trois sortes de *fentes* ou *joints* : 1° Les joints *mineurs*, locaux, limités à une ou quelques strates ; 2° les joints *majeurs*, qui recoupent toutes les strates ; 3° les *lignes de joints* (*joint lines*), ou plans de stratification (Valleys and their relations to fissures, fractures and faults; Londres, Trubner, 1875, in-8°, p. 13 et 20).

M. Daubrée a éclairci la question : « Les cassures des roches ont reçu, en général, le nom de *joints*, adopté par les géologues anglais ; ce nom, emprunté à l'architecture, où il désigne les plans suivant lesquels on a assemblé les assises d'une construction, paraît inexact lorsqu'il s'agit, au contraire, de faces de rupture... Les joints sont plus petits que les failles, auxquelles ils se rattachent parfois et dont ils sont congénères » (Études de géologie expérimentale, p. 300-306, 325, 333, 351). Et il a proposé les très heureux termes généraux de *lithoclases* et de *diaclases*. Le seul inconvénient de cette classification c'est qu'en déclarant que « les diaclases traversent les plans stratifiés » (Eaux souterraines, t. I, p. 133), M. Daubrée semble adopter pour les joints *mineurs* de Kinahan la définition de Viollet-le-Duc (intervalles latéraux), à l'encontre de celle d'Arago; de plus, il ne donne pas de nom aux plans de stratification.

M. Édouard Dupont s'en est aperçu en ces termes : « Les diaclases sont des fentes à travers bancs, qui n'interrompent pas la continuité du plan de ceux-ci » ; .. elles divisent les masses calcaires en grands parallélipipèdes, par leur combinaison croisée *avec un troisième plan, qui est fourni par la stratification* (Les phénomènes des cavernes, *Annales de la Société belge de géologie*, t. VII, 1893, p. 14).

De même, M. de Lapparent: « Les *joints* ou *diaclases* peuvent résulter soit du retrait de la roche par dessiccation, soit des mouvements en masse du terrain, et il s'y ajoute les fentes horizontales que peuvent engendrer les lits de stratification » (De Lapparent, Leçons de géographie physique, p. 85).



dépens des seules diaclases dans des roches point ou à peine stratifiées (dolomies des Causses, etc.).

Je me suis trouvé moi-même si souvent embarrassé, par cette confusion, dans les descriptions à faire, que j'ai fini par appliquer uniquement le terme de *joints* aux plans de stratification, en adoptant pour toutes les autres cassures les noms et la subdivision des *lithoclases*, créés par M. Daubrée. Cela m'a paru si commode, et si conforme à la disposition des cavités explorées, que je proposerai d'opposer tout à fait aux *diaclases* les *joints de stratification*. Observation faite que ces joints, en principe horizontaux, sont souvent, par suite de dislocations postérieures à la sédimentation, fortement redressés sur l'horizon (à Han-sur-Lesse, Adelsberg, etc. ; Les Abîmes, p. 429, 438, 442, 447, etc.), parfois même jusqu'à la verticale (gouffres du Ragas, Var ; de Caussols, Alpes-Maritimes, etc.; Les Abîmes, p. 417); et qu'en conséquence il est inutile et impraticable de chercher un caractère distinctif (comme l'a fait à tort Viollet-le-Duc pour les monuments) dans l'horizontalité ou la verticalité des *joints de stratification*.

*Rôle capital des fissures du sol.* — Ceci posé, tout ce que j'ai vu sous terre, dans plus de trois cents abîmes, cavernes et sources, confirme absolument cette notion générale, fort bien exposée par Desnoyers (mémoire cité), que les fissures du sol, dues tant aux grandes dislocations dynamiques de l'écorce terrestre qu'aux effets plus restreints de rupture par dessiccation, retrait ou compression des roches elles-mêmes, ont été *les directrices générales* des cavités. C'est ce qu'on a pris l'habitude d'appeler les *lignes de moindre résistance*. M. Daubrée a formulé une loi des plus justes en disant que « le premier rôle revient aux cassures souterraines » (Eaux souterraines, I, p. 299). Les cavernes de Bramabiau (Gard ; V. ci-après), Miremont

(Dordogne), Padirac (Lot), Mitchelstown (*) (Irlande, longue de 2 kilomètres), Han-sur-Lesse (Belgique), Adelsberg (Autriche), Sloup (Moravie), Kapsia et Palæochori (Péloponèse), Mammoth-Cave (États-Unis), en sont de topiques exemples pris dans diverses parties du monde.

Comment l'eau s'est ensuite servie de cette canalisation plus ou moins largement préparée d'avance, comment elle en a agrandi et modifié les veines plus ou moins amples pour y établir sa circulation souterraine, comment elle l'a çà et là transformée en cavernes souvent très vastes, c'est ce que nous examinerons tout à l'heure.

Au préalable, il importe de noter que, comme toute bonne règle, cette loi si simple de la genèse des grottes et abîmes souffre certaines exceptions, exceptions tirant leur origine des dissemblances pétrographiques des divers terrains.

**Cavernes indépendantes de la fissuration.** — Ainsi les roches qui, sans être précisément meubles, incohérentes, comme les graviers, ont la propriété de se dissoudre ou de se dissocier dans l'eau, peuvent posséder des vides souterrains naturels indépendants de toute fissuration du sol.

Tels les grès de Fontainebleau et les dolomies sableuses de Montpellier-le-Vieux (**) (Aveyron) qui présentent un certain défaut d'homogénéité : au sein de leurs masses dures, résistantes, se rencontrent des sortes de poches friables, portions de roches dont les éléments n'ont pas été agglutinés par le ciment qui a fait *prendre* le surplus. Ces parties sableuses, *évidées* par les eaux courantes ou d'infiltration, qui entraînaient leur contenu inconsistant,

(*) V. E.-A. Martel, Mitchelstown-Cave, dans l'*Irish Naturalist*, t. V, n° 4, avril 1896, avec plan au 2.000e, Dublin, Eason.

(**) L. de Malafosse, *Bulletin de la Soc. de Géographie de Toulouse*, 1883; — Trutat, Une excursion à Montpellier-le-Vieux, in-8°, 15 p., Toulouse, Durand, 1885 ; — Martel, *Bulletin de la Soc. géologique*, 16 avril 1888, p. 509, et Les Cévennes, p. 127.



ont, par places, donné naissance à de vraies grottes. Ce sont les cavernes « produites par l'entraînement des matières arénacées » (Daubrée). La solubilité du gypse et surtout du sel gemme crée aussi des vides souterrains, non plus par entraînement dû à une eau mouvementée, mais par l'action chimique de l'eau, par la *corrosion* qui *mange* et fait fondre la roche comme du sucre. Ce sont les grottes de dissolution : cavités d'Eisleben et des lacs du Mansfeld (en Thuringe) (*) ; entonnoir d'Ain-Taïba (Sahara) (**) ; cloche de Taverny (Seine-et-Oise, en partie due aussi à l'érosion ; Les Abîmes, p. 410); Kraus-Grotte près Gams (Styrie ; Höhlenkunde, p. 98); mares de Meurthe-et-Moselle ; éboulements du Cheshire, etc.

Ces grottes d'*entraînement* et de *dissolution* ne comportent pas nécessairement la préexistence de fissures en ayant favorisé le développement : l'eau seule est parfaitement capable de les produire ; toutefois, cela n'a lieu que dans des formations géologiques de nature particulière et, en général, sur une échelle assez restreinte.

**Grottes d'explosion volcanique.** — Au contraire, les terrains volcaniques montrent des cavités où l'eau, du moins sous sa forme liquide, n'a nullement concouru au creusement : ce sont les cavernes d'*explosion*, qu'ont ouvertes les éruptions volcaniques ou les bulles de gaz et de vapeur d'eau crevant les roches ; ce sont les grottes de *refroidissement* dues au retrait subi par les roches plutoniques, pendant l'abaissement de leur température. Aux îles Açores plusieurs grandes poches (Forno de Graziosa, Fayal, etc.), depuis partiellement occupées par des eaux d'infiltration, semblent avoir cette origine ; de même,

(*) V. pour les éboulements des terrains et l'abaissement du niveau des lacs du Mansfeld survenus en 1892 : Ule, Die Mansfelder-Seen, Eisleben, 1893, in-12 ; — et Krebs, Die Erhaltung der Mansfelder-Seen, Leipzig, 1894, in-8°.

(**) Daubrée, Eaux souterraines, I, p. 292, 300; II, p. 83.

certaines cavités des coulées d'Islande, d'Auvergne, de la Réunion, de l'Etna, des îles Lipari, etc. (*). Le point est controversé pour la curieuse mofette si froide du *Creux-de-Souci* (Puy-de-Dôme ; Les Abîmes, p. 389, 392), qui peut être due d'abord à l'explosion d'une bulle volcanique et ensuite à l'agrandissement par érosion du vide ainsi produit.

Dans les grottes volcaniques, en somme, la dynamique interne a souvent joué le rôle prépondérant ; et si l'eau est intervenue après coup, c'est rarement avec la même efficacité que dans les calcaires, la roche caverneuse par excellence.

Créer deux autres subdivisions pour les cavernes de *glissements superficiels* et les *cavernes marines* me semble inutile.

En effet, les grottes ménagées entre les interstices de grands blocs éboulés relèvent et de la fissuration et de l'infiltration ; car c'est toujours par dilatation des fissures de la pierre, par dislocation des assises rocheuses, par entraînement ou dissolution de leurs supports, que l'eau, insinuée dans les lithoclases, a provoqué les glissements de pans entiers de montagnes (Rossberg, Elm, Diablerets, Granier, Saint-Laurent, etc., Pas-de-Souci du Tarn, Plurs, Alleghe, Dent-du-Midi, La Réunion, Nanga-Parbat, etc.) (**).

Il est vrai que des chambres souterraines ont pu se disposer naturellement, entre les plus gros fragments du chaos d'effondrement arc-boutés les uns contre les autres. Les causes premières restent les lithoclases et l'eau. Les caves de Roquefort (Aveyron) sont un exemple classique de ce type (***) ; M. A. Janet, de Toulon, vient d'en rencontrer un autre, des plus remarquables et imposants, à Roquebrune, dans le massif des Maures (Var) (*).

(*) V. DE LAPPARENT, Traité de Géologie, 3e édit., p. 393.

(**) Pour les dates de ces grands éboulements, V. Les Abîmes, p. 199; — et DE LAPPARENT, Traité de Géologie, 3e éd., p. 205.

(***) DAUBRÉE, Eaux souterraines, I, p. 301 ; *Tour du monde*, 1875, II, p. 156.



**Autres causes invoquées pour expliquer l'origine des cavernes.** — Rappelons quelques autres idées mises en avant pour expliquer l'origine des cavernes.

Buffon d'abord invoquait les *tremblements de terre ;* insuffisante comme cause unique, celle-ci n'est cependant pas tout à fait négligeable ; le 23 février 1828, un phénomène séismique fit effondrer une partie du grand dôme de Han-sur-Lesse, etc. (V. Les Abîmes, p. 446). Celui de Grèce, en 1894, a ouvert de nombreuses crevasses, comme en Calabre en 1783 (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 2 juillet et 6 août 1894), etc. Par contre, le grand tremblement de terre qui a ravagé, en 1895, la ville de Laibach (Carniole), à diverses reprises, n'a eu aucun retentissement dans les cavernes ou abîmes de Saint-Canzian-Am-Karst, Divacca, Trebič, Adelsberg, Kačna-Jama, etc. (**).

En 1833, M. Parandier lut à l'Académie des sciences et arts de Besançon (séance du 28 janvier 1833) une notice (***) Sur les causes de l'existence des cavernes, où il invoquait quatre ordres de faits : 1° la différence de dureté ou de mollesse des calcaires ; 2° des eaux de corrosion plus denses et plus chaudes que celles de nos jours ; 3° des soulèvements de terrains ayant produit des cassures ; 4° un brusque abaissement des eaux provoqué par ces soulèvements. Il reconnaît déjà, mais moins formellement que ne devait le faire Virlet trois ans plus tard, la véritable importance des fissures du sol.

(*) Communication au Congrès des sociétés savantes à la Sorbonne, 9 avril 1896.

(**) V. *Spelunca*, n° 2 (1895), p. 75 ; — et MARINITSCH, *Mémoires de la Soc. de Spéléologie*, n° 3 (avril 1896), p. 11.

(***) Publiée en 1833 par cette Association et résumée dans le *Bulletin de la Soc. géologique*, 7 mai 1883, 3e s., t. XI, p. 445.

Il est loisible assurément de supposer que les eaux souterraines étaient plus chaudes, plus chargées d'acide carbonique, par conséquent plus dissolvantes. Mais les faits qu'invoquait M. Parandier sont quelque peu hypothétiques. Ses idées n'en ont pas moins été presque intégralement *recopiées*, détail généralement ignoré, par Marcel de Serres dans son livre sur les cavernes à ossements, dont la première édition est postérieure de deux ans au mémoire de M. Parandier. Ces deux auteurs ont soutenu aussi que l'eau par ses dépôts (stalagmites et argile) bouche les cavernes au lieu de les agrandir : cela est vrai pour les eaux dormantes et de suintement, mais pas toujours pour les eaux courantes, dont le mouvement empêche généralement les dépôts, et active l'érosion et la corrosion (Les Abîmes, p. 539).

De Malbos (*) et Lecoq (**) ont voulu substituer à l'action de l'eau celle des gaz dégagés de l'intérieur de la terre ; sauf ce que nous avons dit pour certaines cavernes volcaniques, cela est manifestement une erreur.

Simony et Zippe ont pensé que l'acide carbonique avait commencé par user, par *carier*, les roches calcaires, et que les écroulements étaient survenus ensuite.

Ami Boué (***) a même imaginé que certaines cavernes ont pu être agrandies par les gaz émanant des corps organiques en décomposition (animaux et végétaux) jetés ou charriés fortuitement.

Mais aujourd'hui tout le monde est d'accord (Fournet, Boisse, Thirria, Boyd-Dawkins, Phillips, Hughes, Neumayr, de Lapparent, etc.) pour bien reconnaître l'influence prépondérante des fissures.

**Rôle des failles.** — Avant de terminer ce qui concerne

(*) Mémoire et notice sur les grottes du Vivarais, 1853.
(**) Epoques géologiques de l'Auvergne, t. II, p. 255.
(***) Pour la bibliographie, V. Les Abîmes, p. 540.



le rôle des cassures du sol, rappelons que Boyd-Dawkins n'a pas été le seul à soutenir que « les cavernes ne sont pas généralement sur les lignes de failles » (Cave-Hunting, p. 57). Il se base, pour soutenir cette thèse, sur ce que les cavernes du Peak en Derbyshire (dont je parlerai tout à l'heure) traversent à angle droit deux, sinon trois failles. Or, non seulement les failles servent de canaux d'ascension à quantité de sources ordinaires, minérales et thermales (*), mais encore les exemples de grottes ou d'abîmes pratiqués aux dépens de véritables failles ne sont pas rares : j'ai décrit ou cité moi-même (**) ceux du Boundoulaou (Aveyron), du Tindoul de la Vayssière (Aveyron), de l'Igue de Simon (Lot), des Vitarelles (Lot), de Montmège (Dordogne), de Padirac (***) (Lot), etc., auxquels une importante étude de M. F. Mazauric vient d'ajouter celui, très caractéristique, du *spélunque de Dions* (****) (Gard). L'existence fréquente de cavernes au sein des failles ne peut plus être mise en doute. Elle avait été, d'ailleurs, parfaitement reconnue par Desnoyers (mémoire cité).

*Action des eaux dans les cavernes.* — Examinons maintenant comment les eaux ont agi pour transformer en cavernes les cassures du sol.

**Origine des eaux souterraines. Infiltrations.** — Il est probable que toutes les eaux souterraines ont pour origine les produits de la condensation atmosphérique, précipités sous forme de pluie et de neige, et partiellement engloutis dans les différents *méats* des terrains perméables : soit dans les interstices des formations meubles, soit dans

(*) Daubrée, Eaux souterraines, I et II, *passim;* la Touvre, Vaucluse, etc.
(**) Les Abîmes, p. 175, 179, 240, 309, 320, 365, 537.
(***) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 21 octobre 1895.
(****) *Mémoires de la Société de Spéléologie*, n° 2, février 1896.

les crevasses des roches fissurées ouvertes à la surface même du sol. Cet enfouissement se nomme l'*infiltration*, par opposition au *ruissellement*, qui laisse les eaux météoriques s'écouler à l'air libre sur les pentes des terrains imperméables.

**Eaux thermales. Inaccessibilité de leurs canaux.** — Suivant qu'elles sont ou non arrêtées dans leur descente par des lits imperméables intercalaires, les eaux infiltrées ne pénètrent pas très bas dans l'épaisseur de l'écorce terrestre, ou bien elles s'enfoncent, au contraire, profondément ; les premières forment les nappes *phréatiques* (*Grundwasser*, eaux de puits) des terrains meubles et les sources *ordinaires*, qui jaillissent aux points où une dépression quelconque recoupe une roche perméable superposée à une roche imperméable ; ces sources sont froides ou *tempérées* (inférieures à 25° C.) ; les secondes, après s'être réchauffées plus ou moins bas dans la terre, remontent, de plusieurs kilomètres parfois (*), très souvent par des failles (sources thermo-minérales, et géothermales, geysers, etc.). Sauf accidentellement dans des mines, les canaux et cavités que parcourent ces dernières n'ont pas été jusqu'à présent accessibles à l'homme.

Il est vrai que Miss Luella Owen vient de signaler que la grande *caverne du Vent* (Wind Cave, près Hot-Springs, Dakota) (**), serait, croit-on, « le lit d'un geyser éteint », présentant encore cette particularité de *souffler* parfois de violents coups de vent ; mais cette sommaire indica-

(*) Delesse (Recherches sur l'eau dans l'intérieur de la terre) pense qu'à 18.500 mètres seulement, à 600° de chaleur, l'équilibre se produit entre le poids des roches et la force élastique de la vapeur d'eau. Il y a, d'après lui, de l'eau souterraine libre jusqu'à 18.500 mètres.

(**) 240 chambres et 156 kilomètres de couloirs déjà connus (?) ; profondeur atteinte, 300 mètres.

Cavernes américaines (*Bulletin de la Société de Spéléologie*, n° 5. 1er trimestre 1896).



tion, si nouvelle, devra être contrôlée par un examen scientifique approfondi.

**Réfutation de l'origine geysérienne des abîmes.** — L'obstruction (probablement universelle) des cassures du sol ayant servi de canaux ascensionnels aux sources thermo-minérales aujourd'hui taries, doit contribuer à la réfutation définitive d'une trop séduisante théorie ; c'est celle qui a été mise en avant pour expliquer l'origine d'une catégorie toute spéciale de cavités, les grands puits naturels verticaux qui méritent si bien le nom d'*abîmes* et qui, maintenant encore, à la différence des geysers et volcans éteints, restent vides jusqu'à une notable profondeur. D'Omalius d'Halloy, le premier, a voulu voir dans ces abîmes des *cheminées d'éruptions geysériennes ;* il prenait pour résidu de la dernière éjaculation les argiles ferrugineuses (*sidérolithiques*) trouvées autour et au fond de ces gouffres; Scipion Gras, MM. Bouvier, Lenthéric et P. Raymond l'ont suivi dans cette opinion (*). Je répéterais ce que j'ai dit ailleurs, si je rappelais longuement comment les profondes descentes que les Autrichiens et nous-mêmes avons opérées jusqu'à 200 et même 300 mètres sous terre, dans ces étroites cassures à pic, ont démontré aussi la fausseté de cette hypothèse geysérienne (**). Certes, les véritables *cheminées* de la Kačna-Jama (***) (Istrie ; 213 mètres), la grotte des Morts (Istrie ; 255 mètres), Vigneclose (Ardèche ; 190 mètres), Jean-Nouveau (Vaucluse ; 163 mètres), Rabanel (Hérault ; 212 mètres), Trouchiols (Aveyron ; 130 mètres), etc., etc., excusent, par leur seule coupe, l'idée qu'on a eue d'en faire

(*) Adoptée partiellement par M. Parandier (*notice citée*, p. 7 et 20, et *Compte rendu sommaire des séances de la Société géologique*, 15 juin 1896, p. CXIV).

(**) Les Abîmes, p. 38, 48, 475 et 519 ; *la Nature*, n° 1049, 24 juin 1893 (abîme de Jean-Nouveau).

(***) V. J. Marinitsch, La Kačna-jama, *Mémoires de la Société de spéléologie*, n° 3, avril 1896.

des *évents* d'eaux profondes. (N'a-t-on pas même été jusqu'à traduire ainsi le mot *aven* qui, d'après M. Daubrée (*), paraît venir bien plus naturellement du celtique *avain*, ruisseaux, en bas-breton *awen?*) Mais elles ne suffisent pas pour la justifier; et leurs dispositions intérieures la condamnent complètement; elles contiennent presque toutes des cloisons intermédiaires et des corniches (ou redans), que la force éruptive interne eût certainement emportées et nivelées. Si la plupart de ces tuyaux sont bouchés au fond, c'est souvent par les matériaux qui y sont tombés depuis des centaines de siècles; quelques-uns sont greffés sur de vastes cavernes en pente douce où circulent encore parfois les crues de rivières souterraines (Rabanel et Kačna-Jama); il en est de même de beaucoup d'autres puits naturels maintenant connus: Trébič (Istrie; 322 mètres), Padrič (Istrie; 270 mètres), Gradisnica (Carniole; 225 mètres), Bassovizza (Istrie; 205 mètres), Viazac (Lot; 155 mètres), la Bresse (Aveyron; 133 mètres), Hures (Lozère; 130 mètres), etc., qui, non seulement communiquent avec des grottes nullement verticales, mais encore sont formés d'une série de *bouteilles* superposées, indiquant nettement l'action des eaux superficielles engouffrées et tournoyantes; je me suis trop étendu, dans mes précédentes publications, sur cette véritable origine de la plus grande partie des puits naturels, pour y insister de nouveau ici. Il suffira de retenir que, si ceux qu'on n'a pas trouvés obstrués par des matériaux de transport aboutissent tous à des galeries développées surtout dans le sens horizontal, c'est uniquement parce que l'eau perforante a dû changer son mode de descente, en atteignant des couches de terrain imperméable; au contact des formations argileuses, elle a remplacé la chute verticale par un écoulement dans le sens du pendage, à la base des roches perméables fissurées. Si le puits supérieur était une cheminée geysérienne, pourquoi donc serait-il brusquement prolongé par une galerie en pente douce?

(*) Eaux souterraines, I, p. 297.



**Terra Rossa.** — Enfin, de savants géologues (*) ont contribué à faire abandonner l'hypothèse de d'Omalius d'Halloy, en démontrant que l'argile rouge (*terra rossa* du Karst), dite sidérolithique, n'est que la « cendre insoluble du calcaire » (Mojsisovics), le résidu de la « décalcification » (Munier-Chalmas) des roches calcaires, débarrassées de leur carbonate de chaux par la *corrosion*, ou action chimique des eaux météoriques acidulées. Cette *cendre* n'a rien d'éruptif; son origine est purement hydrologique.

Je viens d'empiéter sur ce que j'aurai à dire bientôt des abîmes; mais la réfutation de la *théorie geysérienne* rentre bien dans l'étude de l'origine des cavités du sol; de plus, j'ai établi ainsi que l'allure des eaux thermales remontantes et leurs effets sur les cassures n'ont pas pu, jusqu'à présent, être examinés pratiquement; les travaux de mines eux-mêmes n'ont guère permis que des conjectures théoriques. Je reviendrai sur ce sujet dans la troisième partie du présent mémoire.

Étude des eaux dans les cavernes. — Au contraire, les eaux d'infiltration ordinaires ont pu être atteintes et étudiées matériellement, jusqu'à un peu plus de 300 mètres au-dessous de la surface du sol (à la Kačna-Jama, 305 mètres, et à Trébič, 322 mètres; V. ci-dessus). Et le principal résultat des explorations faites en France et en Autriche, depuis dix ans, a été justement de faire mieux connaître « les dispositions indéfiniment variées par lesquelles les lithoclases déterminent et dirigent la circu-

(*) Fuchs, Neumayr, Leenhardt, Van den Broeck, Diener, Cvijič, etc. V. Les Abîmes, p. 519.

lation des eaux souterraines » ; elle a rendu praticable cette « classification rationnelle de ces mécanismes », que M. Daubrée, en 1887, déclarait « très difficile, sinon impossible, si l'on tient compte de l'impuissance où se trouve l'observateur de suivre ces dispositions jusqu'à une grande profondeur » (Eaux souterraines, I, p. 129).

*Pénétration profonde par les abîmes.* — Cette œuvre de pénétration profonde, si importante pour la connaissance et la régularisation artificielle du régime des sources, pour la main-mise sur une foule de réservoirs souterrains inutilisés, en est à peine à ses débuts : elle est restée, jusqu'à présent, dévolue à l'initiative privée de trop petits groupes de spécialistes ; il lui faudra l'appui des pouvoirs publics et le concours de nombreux adeptes pour progresser comme elle doit le faire. La *traversée* complète d'un des grands Causses languedociens sur 400 à 500 mètres d'épaisseur, de la gueule d'un haut aven à l'issue d'une source basse, n'a pas encore pu être effectuée, à cause des difficultés qu'elle présente et des coûteux travaux qu'elle entraînerait. Bien que l'eau, certainement, la réalise, il n'est même pas encore prouvé qu'elle soit matériellement possible pour l'homme.

Les gouffres jusqu'ici explorés ont, en effet, conduit aux constatations et réflexions suivantes.

Il en est deux qu'on a débouchés, l'un très facilement, le Tindoul de la Vayssière (Les Abîmes, p. 68 et 239), l'autre, à l'aide de travaux considérables, le Trébič (V. *suprà*) et qui ont mené à des rivières souterraines.

Il en est un au contraire qu'on a rebouché en y jetant des pierres : c'est celui de Calmon (Lot ; Les Abîmes, p. 330), où MM. Pons et l'abbé Albe, en 1895, n'ont pas pu refaire (*) notre première exploration de 1892.

(*) *Spelunca*, n° 4, 1895, p. 130.



Il en est un autre où les travaux d'élargissement ont dû être arrêtés, devant la persistance du rétrécissement des parois ; c'est la grotte des Morts, près de Trieste (Les Abîmes, p. 475), qui a inutilement fait perdre 20.000 francs et quatre vies humaines.

Ceux où il faudrait essayer la désobstruction se présentent, au fond atteint actuellement, sous trois aspects différents :

1° Bouchés par des talus de pierres, des amas de sable, ou des concrétions stalagmitiques, à travers lesquels l'eau filtre, et dont l'accumulation n'est peut-être due qu'à un court rétrécissement des fissures naturelles : ainsi Gaping-Ghyll (Yorkshire, Angleterre) (*) absorbe, dans son fond de gravier, la cascade qui se précipite dans sa cheminée haute de 100 mètres et qui, 1.600 mètres plus loin et 50 mètres plus bas, ressort à Ingleborough-Cave ; — Trouchiols (Causse Noir ; 130 mètres) se termine de même, et ses eaux de suintement doivent reparaître par une source riveraine de la Dourbie ; mais ici la descente inconnue atteint l'épaisseur de 270 mètres. Qui sait s'il ne suffirait pas d'un léger déblai dans les éboulis des avens de Dargilan, de Fontlongue, de Ganges et de Jean-Nouveau, pour conduire aux prolongements des grottes de Dargilan (Lozère), Saint-Marcel (Ardèche), Ganges (Hérault) et aux canaux mystérieux de Vaucluse? Les stalagmites ou les pierres une fois enlevées au Marzal et à Vigne-Close (Ardèche), à Planagrèze et aux Brantites (Lot), à Padrič et à la Kosova-Jama (Istrie) (**), etc., que ne trouverait-on pas en arrière ?

2° Arrêtés, en apparence, par une argile imperméable, plus ou moins imprégnée d'eau ; à lou Cervi (Vaucluse), à

(*) E.-A. Martel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 6 janvier 1896 ; et *la Nature*, n° 1182, 25 janvier 1896.

(**) *Spelunca*, n° 4 (1895).

Rabanel (Hérault), à Viazac (Lot). Se trouve-t-on alors en présence d'une alluvion souterraine et d'un résidu de décalcification, ou bien au sommet d'une zone intercalaire de marne argileuse formant niveau d'eau? Dans le premier cas la désobstruction du bouchon peut réussir. Pour le second cas, j'exprimais, en 1889 (*), à la suite de ma première campagne, la crainte « qu'à la base des dolomies supérieures des Causses, le couronnement argileux des marnes constituât une couche imperméable »; et je me demandais si les eaux retenues par ces marnes se déversent plus bas par de menues gerçures de suintement, ou bien, comme l'a indiqué M. Fabre, par des failles (ou diaclases) coupant les plans d'eau superposés aux marnes. La question reste pendante: dans les zones marneuses, plus ou moins pâteuses et délayables, le hasard et le déblaiement peuvent seuls faire découvrir des fentes assez larges et assez libres pour livrer passage à l'homme et lui permettre de suivre l'eau.

3° Terminés, après une plus ou moins longue descente de grand diamètre, par des fissures si étroites qu'on peut les dire capillaires : à Combelongue (Causse Noir), j'ai pu, en vrai ramoneur, descendre dans une cheminée de ce genre, de 30 à 50 centimètres de diamètre, pendant 25 mètres ; plus bas, la fissure se prolongeait d'autant au moins, mais avec 15 centimètres seulement de diamètre ; à l'abîme de Hures (Causse Méjean), l'exploration de M. Arnal (en 1892) a été arrêtée par un gros tronc fermant une crevasse (à 130 mètres sous terre), dans laquelle les pierres tombaient beaucoup plus bas ; se rétrécissant ainsi, le trou de Champniers (Charente) m'a empêché d'arriver aux réservoirs inconnus de la Touvre ; de même, j'ai rencontré pareil obstacle dans les petits gouffres de

(*) *Bulletin de la Société géologique*, 3e série, t. XVII, 20 mai 1889, p. 619.



Cong (Irlande), qui ne m'ont pas permis d'atteindre les communications souterraines existant entre les deux loughs (lacs) Mask et Corrib. Le Katavothre de Gatzouna (Péloponèse) se continue par une fissure impénétrable d'au moins 18 mètres de profondeur (Les Abîmes, p. 510; V. aussi p. 113, 203, 207). Que donnerait l'élargissement de ces fentes? l'échec de la grotte des Morts? ou l'étonnant résultat de Trébic ? Les sources basses du Causse Méjean, toutes siphonnantes à plus ou moins brève distance, sont, sans doute possible, la fin de courants souterrains, comme ceux du Tindoul, de Padirac, du Mas Raynal, des Combettes, de la Piuka ! Tenant compte de la distance, et de la pente de ces rivières intérieures (qui atteint parfois 15 p. 100), et se rappelant qu'elles ont pu être rejointes naturellement par les gouffres eux-mêmes, là où l'épaisseur du plateau ne dépasse pas 100 mètres, il est absolument permis d'espérer à Hures un nouveau Trébic, peut-être guère plus profond, et menant à l'aqueduc-réservoir d'une source. A cause de la grande différence d'altitude, il est probable que le *soutirage* du drainage a été assez énergique pour pratiquer de larges canaux de descente. Tout est subordonné, comme dans le cas précédent, à la teneur en argile des zones intermédiaires entre les abîmes et les sources et au degré de *colmatage* souterrain des fentes naturelles de ces zones.

L'aven de Hures, que je viens de citer, est un des premiers dont il faille tenter la désobstruction. C'est celui qui présente le plus de chance de pénétrer de part en part un grand Causse, plus puissant que le Larzac au Mas-Raynal. Quand une telle pénétration réussira, on y résoudra sans doute de capitaux problèmes hydrologiques. C'est une entreprise de l'avenir, aujourd'hui amorcée à ses deux extrémités : mais sa réalisation exigera des travaux qu'un particulier ne saurait entreprendre.

Il y a des cavités où l'échappement intérieur des eaux

s'est fait, ou se fait encore, par des fissures de plus en plus rétrécies, mais à un niveau inférieur à toutes les plaines et vallées environnantes ; ou, du moins, si peu différent, qu'on ne connaît aucune fontaine pouvant servir d'issue à ces eaux : telles sont les grottes de Mitchelstown (Irlande), Cravanche (près Belfort), Miremont (Dordogne), etc., et les pertes de la mer à Argostoli (Céphalonie; V. Les Abîmes, p. 522). Bien qu'on soit sûr par là de ne jamais déboucher au dehors, il n'en serait pas moins curieux de désobstruer aussi de telles extrémités : on y pourrait recueillir des données sur les conditions de descente de ces eaux, qui sans doute ne remontent au jour qu'après un assez bas voyage plus ou moins réchauffant, ou qui vont alimenter les nappes profondes et les nappes artésiennes.

Actuellement, ce qui a déjà été fait depuis la rénovation des explorations souterraines et le perfectionnement industriel de leurs méthodes, permet d'expliquer au moins comment les eaux d'infiltration ont matériellement opéré pour agrandir les lithoclases.

*Érosion et corrosion.* — La plus vive controverse s'était élevée à ce sujet entre les géologues; les uns affirmant que l'*érosion*, ou action mécanique de l'eau en mouvement charriant des graviers, galets, etc., était prépondérante; les autres, que la *corrosion* ou action chimique de l'eau chargée d'acide carbonique l'emportait. Il serait oiseux d'expliquer ici ce que l'on entend par ces deux termes si connus.

Mieux vaut établir, à l'aide d'exemples bien choisis, que, comme dans la plupart des théories relatives aux cavernes, aucune des deux n'est ici absolue : il faut, pour appliquer l'une de préférence à l'autre, distinguer entre les diverses sortes de terrains. Il faut surtout généraliser et proclamer, encore avec M. Daubrée, dont toutes les



vues théoriques ont reçu, des dernières recherches pratiques, les plus éclatantes confirmations, que, dans les cavités naturelles, « l'action des eaux d'infiltration a été et est encore *à la fois* mécanique et chimique » (Eaux souterraines, I, p. 299).

Vouloir déterminer, d'une manière générale, la part précise de chacune de ces deux actions, c'est poursuivre un problème aussi vain qu'insoluble.

Trois principes seulement peuvent être posés et reconnus dès maintenant comme définitifs :

1° La corrosion l'emporte dans la destruction des roches solubles comme le gypse et le sel gemme;

2° L'érosion domine dans le creusement des grottes marines et de certaines cavernes volcaniques;

3° Mais ces deux effets « s'exercent d'ordinaire ensemble, et ne doivent pas être étudiés séparément(*) » (De Lapparent).

J'ai donné plus haut suffisamment d'exemples du premier principe, en parlant des cavités qui se forment sous l'action de l'eau seule, abstraction faite de toute fissuration préexistante. D'ailleurs, « il n'est pour ainsi dire aucune substance qui soit complètement insoluble » (Delesse).

**Érosion. Grottes marines.** — Le deuxième principe trouve sa principale confirmation dans cette observation universelle, que *les grottes des rivages maritimes sont creusées dans des terrains bien plus variés et bien plus résistants que les cavernes de l'intérieur des terres*. Assurément l'eau de mer est, jusqu'à un certain point, corrosive; mais n'est-ce pas plutôt par les chocs violents et réitérés de ses vagues de tempêtes qu'elle a pu creuser ces *puffing-holes*(**) perforés de bas en haut, ces ponts naturels,

(*) De Lapparent, Leçons de géographie physique, p. 228; Paris, Masson, in-8°, 1896.

(**) V. E.-A. Martel, *la Nature*, n° 1196, 2 mai 1896.

ces portails énormes et ces cavités parfois profondes : à Crozon, dans les granites bretons, — à Jobourg, dans les schistes du Cotentin, — au Trayas (Var), dans les porphyres de l'Estérel, — aux îles Lipari, dans des coulées trachytiques (*), — aux falaises de Kilkee et du Donegal (Irlande), dans les schistes ardoisiers carbonifères, — à la Chaussée des Géants (Irlande), à la grotte de Fingal (îles Hébrides, Staffa), dans les denses et ferrugineux basaltes, — à Helgoland (mer du Nord), dans les grès bigarrés du trias, — à l'île de Thorgatten, enfin, dans les vieux gneiss norwégiens (**).

Toutes ces roches silicatées, quoique attaquées dans une certaine mesure par l'eau et l'air chargés d'acide carbonique, ne se désagrègent-elles pas surtout par les coups furieux d'une sape et d'une mitraille intermittentes, plutôt que par l'effet continu d'une lente dissolution? (V. De Lapparent, Traité de Géologie, 3e édit., p. 227 et 319, etc.) Je n'ai pas vu encore la fameuse caverne de Surtshellir, en Irlande, qui a, dit-on, plus de 1.500 mètres de longueur dans la lave ; mais je suis bien convaincu qu'elle est due à l'élargissement de fissures de refroidissement, par l'érosion d'un cours d'eau, qui cherchait sa route sous la coulée, ou qui y retrouvait un ancien lit de rivière comblé par cette coulée (***). La corrosion paraît borner son effet sur le basalte à le revêtir d'une couche d'oxyde de fer qui devient plutôt protectrice ; j'ai bien étudié la Chaussée des Géants à ce point de vue : les galets et fragments de prismes qui en forment les plages, n'ont nullement l'aspect spongieux des fragments détachés des falaises calcaires ; bien souvent ils sont *roulés*, malgré leur dureté,

(*) V. la belle publication de l'Archiduc Salvator, Die Liparischen Inseln, 8 fascicules in-folio ; Prague, Mercy, 1893-1896.
(**) V. E.-A. Martel, *la Nature*, n° 1176, 14 décembre 1895.
(***) V. De Lapparent, Leçons de géographie physique, p. 238.



jamais rongés : c'est assurément par choc mécanique et non par usure chimique que leurs prismes se dissocient.

Je crois devoir répéter ici, pour mettre fin à la controverse, ce que j'ai déjà dit (*). Du moment que l'on explique « surtout par l'érosion les crevasses gigantesques des *cañons*, les accidents étranges des *Erd-Pyramiden*, cheminées des fées, obélisques naturels, ponts de rochers, etc. (**), il est irrationnel de ne pas concéder aux ondes souterraines la puissance que l'on prête aux flots superficiels, alors surtout que, emprisonnée dans les étroitesses des cavernes, l'eau doit acquérir par *pression hydrostatique* une force considérable qui multiplie les énergies destructives ».

*Corrosion : ses trois preuves.* — Quant au troisième principe, n'importe quelle grande grotte à rivière souterraine des terrains calcaires montrera juxtaposés, aux yeux les moins clairvoyants, les doubles et distincts, quoique simultanés, effets de la corrosion et de l'érosion : au Tindoul de la Vayssière (Aveyron), à la Poujade (Aveyron), à Han-sur-Lesse (Belgique), à la Piuka d'Adelsberg (Autriche), à Marble-Arch (Irlande), etc., en un mot partout où l'eau passe ou a passé dans les galeries calcaires souterraines, la corrosion se révèle par trois indices.

1° **Cupules et rayures.** — Premièrement : l'aspect tourmenté des parois, *cupulées*, creusées de petites cavités peu profondes, mais très rapprochées, ou *rayées* de rigoles plus ou moins sinueuses et accentuées ; cet aspect varie à l'infini selon le degré de résistance du calcaire ; dans certaines *igues* (gouffres) du Causse de Gramat, la roche semble perforée de véritables trous de vers discontinus,

(*) Les Abîmes, p. 538 ; — V. Kraus, Hohlenkunde, p. 91.
(**) V De Lapparent, Traité de Géologie, 3e édit., p. 158 et 183 ; — Géographie physique, p. 157 et suiv.

comme une pomme gâtée ; au Tindoul, à Adelsberg et dans les calcaires carbonifères d'Irlande, noirs et compacts, les assises en place et les blocs éboulés sont, dans le sens du courant, zébrés de petites rigoles longitudinales parallèles, comme celles que les cinq doigts de la main pourraient tracer dans une argile humide ; ce curieux effet est si trompeur, que j'ai souvent pris pour de la glaise molle la pierre ainsi corrodée ; il rappelle tout à fait les *Lapiaz*, *Rascles*, *Schrattenfelder*, *Karrenfelder*, des massifs calcaires alpestres (*). Si la roche est plus tendre, elle devient friable sur 1 ou 2 centimètres d'épaisseur, décomposée par l'acide de l'eau et se délitant alors sous la main ; c'est ce qu'on observe à l'igue de Biau (Lot) (Les Abîmes, p. 303) et à la sortie de la source de Fonderbie, près de Limogne (Lot), que j'ai visitée en 1895, et dont la galerie, praticable sur 230 mètres en temps de sécheresse, est principalement l'œuvre de la corrosion.

Je pourrais multiplier en grand nombre les preuves authentiques de corrosion ; peut-être les plus curieux effets de ce genre que j'aie jamais observés sont-ils ceux du Lough-Mask, dans l'Irlande occidentale (juillet 1895) ; ce lac (altitude, 19 mètres ; profondeur, 38 mètres), sans émissaire aérien, est séparé du Lough-Corrib (altitude, 9 mètres ; profondeur, 37 mètres) par un isthme de calcaire carbonifère de 3 à 5 kilomètres de largeur, et de moins de 100 mètres d'altitude ; la communication entre les deux lacs est souterraine, et se manifeste par la sortie des eaux aux nombreuses sources de Cong (à la tête du Lough-Corrib) ; j'ai dit plus haut que les gouffres et cavernes de l'isthme

(*) V. Les Abîmes, p. 110 et 519 ; — Simony, Das Dachstein-Gebiet ; Vienne, Hölzel, 1891-1895, in-4° ; — De Lapparent, Traité de Géologie, 3e édit., p. 315 ; — Émile Chaix, Topographie du désert de Platé (Haute-Savoie), *Le Globe* (Société géographique de Genève), t. XXXIII (5e série, t. V, *Mémoires*, p. 67-108).



ne m'avaient pas permis d'accéder au tunnel naturel, dont on supposait ici l'existence (Daubrée, Eaux souterraines, t. I, p. 351).

Mais j'ai relevé sur la rive méridionale du Lough-Mask, près des antiques et modestes ruines de la petite abbaye de Rosshill, les preuves suivantes de l'action chimique de l'eau (*) : la grève est couverte de gros blocs de calcaire carbonifère noir, dont toutes les faces, creusées de cupules, profondes de 5 à 10 centimètres, semblent de véritables écumoires ; il faut que les pluies (ou les hautes eaux du lac) soient singulièrement chargées d'acide carbonique pour ronger à ce point une pierre aussi compacte. Et si l'eau du Lough-Mask, infiltrée sous l'isthme de Cong, y a *mangé* la roche de pareille façon, il est très possible que la corrosion ait suffi à frayer un passage au liquide entre les parallélipipèdes de la pierre ; qu'elle ait fait de l'isthme une véritable éponge à larges pores, sans que l'érosion ait eu besoin d'y façonner les *joints* et les diaclases en ces larges et longues galeries, que nous sommes habitués à rencontrer partout sous les terrains calcaires. D'ailleurs, la faible altitude générale de la contrée au-dessus du niveau de la mer ne laisse qu'une très légère pente aux eaux souterraines (8 mètres pour 4 kilomètres environ, soit 2 pour 1.000), ce qui diminue naturellement la puissance de leur action mécanique. Quant aux effondrements superficiels qu'on remarque sur l'isthme, ils peuvent être parfaitement produits par les seuls effets de la corrosion, au-dessus des points où l'eau souterraine acidulée a le plus énergiquement dissocié la roche intérieure.

(*) D'autres analogues, sur les bords du Lough-Corrib, avaient déjà vivement frappé Kinahan (Valleys, p. 143), qui, d'après le professeur Melville de Galway, attribue à la décomposition acide des mousses et lichens une grande part dans ces effets.

Ajoutons qu'en 1846-1847, durant la famine des pommes de terre, on entreprit là un grand travail : tant pour fournir de l'ouvrage aux populations affamées, que pour créer une communication aérienne entre les deux lacs, on creusa, de l'un à l'autre, et à même le roc, un canal sinueux de près de 7 kilomètres. D'un seul élément on avait omis de tenir compte : la fissuration et, par suite, la perméabilité du calcaire; jamais le canal ne put tenir l'eau, qui en traversait le fond comme un simple tamis. Il subsiste toujours à l'état d'immense fossé sec, qu'on a nommé « la grande bévue ».

Quatre fois, paraît-il, en 1178, 1190, 1647 et 1683, la rivière qui sort du Lough-Corrib, vers Galway, a tari subitement. M. Kinahan suppose qu'il avait dû alors se rouvrir provisoirement quelqu'un de ces déversoirs souterrains, qui existaient jadis encore plus nombreux que maintenant dans les lacs d'Irlande, et que des causes diverses, telles qu'un affaissement du sol ou une obstruction par le sable, ont supprimés depuis dans les bas-fonds lacustres (Kinahan, Valleys, p. 159 et 161).

2° **Amas d'argile rouge**. — Deuxièmement : les amas d'argile rouge qui, dans l'intérieur des cavernes, sont aussi souvent, il faut le reconnaître, le produit local de la décomposition chimique du calcaire que des alluvions apportées de l'extérieur. Fréquemment ces amas ont bouché des galeries rétrécies qu'il serait facile de désobstruer (Les Abîmes, p. 539).

3° **Dépôts extérieurs de tufs**. — Troisièmement : au débouché des rivières souterraines, les tufs ou travertins, souvent considérables, déposés principalement quand l'eau sort en cascades, dont la chute facilite l'évaporation : l'excédent du carbonate de chaux enlevé par l'eau aux roches internes se précipite alors de nouveau, formant la contre-partie du résidu argileux laissé à l'intérieur (Salles-la-Source et source de la Sorgues, Aveyron; — grotte de Baume-les-



Messieurs, à la source du Dard, Jura (*); — la Boudène, Gard (**); — etc.).

*Érosion : ses preuves*. — Passant maintenant aux effets de l'*érosion*, nous verrons qu'elle est bien le principal auteur des *décollements* (***) de strates qui forment tant d'éboulements; presque toutes les rivières souterraines ont leur cours plus ou moins barré par des portions d'assises rocheuses tombées en travers de leurs lits ; il suffit pour cela que l'eau chasse, dans les *joints* des strates, les graviers et même les galets, que sa pression d'amont en aval enfonce de plus en plus, comme un coin dans une pièce de bois; à la longue, le coin fait éclater le *joint*, et il suffit que la disposition des *lithoclases*, perpendiculaires ou obliques aux joints, s'y prête, pour qu'une forte portion de strate généralement parallélipipédique se détache de la voûte ou de la paroi ; dans sa chute, souvent la strate se brise en gros ou menus fragments; ceux-ci, roulés par l'eau, vont faire coin à leur tour entre les strates d'aval; ceux-là, plus ou moins immergés, achèvent de se désagréger sous le choc ou la morsure du courant (V. Les Abîmes, p. 540). Ce *processus* est particulièrement bien indiqué dans la rivière souterraine du Tindoul et de Salles-la-Source et dans la belle source d'Arch-Cave, près Enniskillen (Irlande), que j'ai explorée, en 1895, avec M. Jameson.

Dans la craie blanche, où je citerai l'antre immense de Miremont ou Cro de Granville (****) (Dordogne; 4.900 mètres de développement), et les curieuses petites grottes natu-

(*) V. E. Renault, *Tour du Monde*, mai 1894.

(**) V. F. Mazauric, *Spelunca*, n° 3, 1895, p. 87.

(***) Ce sont ces décollements de strates qui, à Adelsberg, ont fait imaginer par Schmidl des chutes de *cloisons* mettant en communication des chambres préexistantes (Adelsberg, p. 133 et 198).

(****) V. *Annales des Mines*, t. VII, 1822, par Allou; — et chap. xx des Abîmes.

relles de Caumont (Eure), le milieu est si tendre et délayable qu'il est impossible de distinguer l'une de l'autre la corrosion et l'érosion.

**Coupoles des voûtes.** — Cependant, c'est assurément cette dernière qui a creusé dans les voûtes un certain nombre de cavités en forme de coupoles, vraies marmites de géants renversées; on en rencontre dans toutes les cavernes, même dans les calcaires si durs de Peak-Cavern (Derbyshire) et d'Ingleborough (Yorkshire); elles sont dues au tournoiement de l'eau sous pression. Enfin, les angles émoussés, les surfaces polies comme du marbre, les galets roulés, les larges gouttières d'écoulement, etc., abondent suffisamment pour trahir à chaque pas l'énorme importance de l'érosion.

Et il faut bien conclure que, pour les rivières souterraines, et dans les formations calcaires, l'action chimique et l'action mécanique ne doivent et ne peuvent pas être considérées comme agissant séparément.

CIRCULATION DES EAUX D'INFILTRATION DANS LES CAVERNES. — Ayant ainsi établi comment l'eau d'infiltration agit sur les roches et élargit les joints et les lithoclases en cavernes, examinons sa circulation souterraine, qui comprend: 1° le mode d'introduction dans le sol; — 2° celui de l'écoulement ou de la propagation à l'intérieur; — 3° celui de la sortie sous forme de sources.

1° *Pénétration des eaux dans le sol.* — Les eaux météoriques pénètrent dans les fissures des terrains crevassés de diverses manières: ou bien goutte à goutte et inégalement vite, dans les toutes petites fentes (leptoclases) plus ou moins bien obturées par la terre végétale; c'est ce qu'on nomme particulièrement le *suintement*; — ou bien sous forme de ruisseaux nés sur des terrains imperméables et qui, amenés par leur pente au



contact des formations crevassées, s'y perdent subitement dans des fentes assez larges pour les engloutir en entier; le terme d'*absorption* est généralement consacré à ce deuxième mode de pénétration. Les fentes d'absorption elles-mêmes sont de trois sortes: *entonnoirs* sans profondeur remplis de terre, de bois mort et d'autres matériaux de transport, entre lesquels l'eau seule peut trouver un passage; ce sont les *bétoires* de Normandie; les *pertes* du Ventoux, de la Charente, d'Issendolus (Lot), les *Sauglöcher* (suçoirs) des Autrichiens, les *swallow-holes* (avaloirs) des Anglais, les *Aiguigeois* de Belgique, les *ponors* de Dalmatie, etc., etc.; ils sont bouchés pour l'homme; — *cavernes* à pente douce ou rapide (Han-sur-Lesse, Adelsberg, Bramabiau, Réveillon, etc.), où le courant peut être suivi plus ou moins loin; et pour lesquelles j'ai proposé le nom de *goules*, usité dans l'Ardèche; les grands *Katavothres* de Grèce ont généralement cet aspect; — *puits verticaux*, enfin, où le ruisseau se précipite en cascade dans l'*abîme*.

La plus grande confusion règne dans la nomenclature de ces trois sortes de puits d'absorption: MM. Kraus (*), Cvijić et moi-même nous n'avons pas pu encore identifier dans une bonne classification les innombrables noms locaux qui, en France et en Autriche surtout, s'emploient trop souvent les uns pour les autres. — Celui de *puits naturels* reste le plus exact; et celui d'*abîme* (*aven* dans une partie de la France) convient bien aux noirs gouffres profonds, dont j'ai exploré plus de cent depuis 1888. Cette dernière catégorie de cavités naturelles, ainsi percées à pic dans la terre, est peut-être celle qui a donné lieu aux plus vives polémiques.

J'indique tout de suite que, dès mes premières descentes, j'ai considéré en principe les abîmes comme formés de

(*) Hohlenkunde, p. 138.

haut en bas, par l'action chimique et mécanique à la fois d'eaux engouffrées dans de grandes diaclases verticales.

*Origine des abîmes.* — **Creusement de haut en bas par les eaux.** — Ma dernière campagne en Grande-Bretagne (1895) n'a fait que me confirmer dans cette idée. Les abîmes d'Irlande et d'Angleterre, en effet, à la différence de ceux des Causses et du Karst, fonctionnent encore en tant que puits d'absorption superficielle ; la pénible descente, surtout, que j'ai effectuée, le 1er août 1895, dans celui de Gaping-Ghyll (*), profond de 100 mètres, au milieu même de la cascade qui y tombe, a été l'irréfutable démonstration matérielle qu'il n'y a point là de cheminée geysérienne, et que l'érosion (choc de la colonne d'eau et des pierres qu'elle entraîne) est un puissant facteur d'élargissement nullement exclusif, d'ailleurs, de la corrosion ; cette décisive investigation me dispense de résumer les preuves accumulées lors de mes recherches (**), et attestant que la grande majorité des puits naturels a bien été *creusée* de haut en bas comme de colossales marmites de géants, plus larges en bas qu'en haut, à cause de l'échappement des eaux par la partie inférieure. Je suis absolument affirmatif sur ce point. Ceux qui n'absorbent plus d'eau actuellement peuvent être considérés comme *morts ;* la plupart ont conservé, d'ailleurs, sur un côté de leur orifice, un thalweg ou un ravinement tracé par les courants d'antan (***). A l'intérieur, certains

(*) V. le récit et les résultats détaillés de cette expédition dans *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 6 janvier 1895 ; — *la Nature*, n° 1182, 25 janvier 1896 ; — et *Annuaire du Club alpin-français* pour 1895.

(**) V. Les Abîmes, chap. XXIX, p. 516, 336, 171, etc.

(***) En dehors de la Grande-Bretagne, je citerai comme puits verticaux absorbant encore des ruisseaux : l'embut de Saint-Lambert (plateau de Caussols, Alpes-Maritimes), le Trou-du-Toro (Maladetta, Pyrénées), la perte de la Ljuta (près Raguse, Dalmatie), certains katavothres de la plaine de Tripolis (Péloponèse), etc., etc.



sont rayés d'une spirale ou hélice que l'eau seule a pu produire (V. Les Abîmes, p. 48, 110, 208, 225, 317, 336, etc.).

**Orgues géologiques.** — Reproduisant pour les puits naturels la controverse soulevée pour les cavernes au sujet de la prépondérance de la corrosion sur l'érosion, beaucoup d'éminents géologues n'ont voulu voir dans ces tuyaux que des *orgues géologiques*, comme celles de la montagne crétacée de Saint-Pierre, à Maëstricht (Hollande), rendues classiques par Faujas de Saint-Fond et Bory de Saint-Vincent ; ils en ont fait avant tout des entonnoirs de décalcification (Les Abîmes, p. 518) ; cette exclusion de la force érosive peut être exacte par exemple dans les falaises crétacées du pays de Caux (Étretat, Fécamp), etc., des berges du Clain, près Poitiers (V. Daubrée, Eaux souterraines, I, p. 294), qui nous montrent des sections de poches hautes de plusieurs mètres et même de plusieurs décamètres, remplies d'argile rouge. Que l'action chimique seule d'eaux doucement infiltrées ait produit là une totale et lente décomposition, sans le concours d'aucun effet mécanique, cela est tout à fait vraisemblable ; mais le phénomène est particulier, comme celui du creusement de cavernes par la dissolution du gypse ou du sel ; il convient de ne pas le généraliser et de le considérer plutôt comme une exception, due à la nature de la roche crayeuse et confirmant la règle que j'ai énoncée plus haut ; car ces poches justement n'aboutissent pas, comme les abîmes, à des cavernes, parce que les mouvements érosifs n'ont pas contribué à prolonger leur creusement.

**Effondrements.** — Une autre forme d'abîmes que l'on a souvent considérée comme la règle, et où je persiste à ne voir que des exceptions, est celle des effondrements au-dessus du cours de rivières souterraines ; l'abbé Paramelle, Fournet, en France, Tietze, Schmidl, Lorenz,

Urbas, Fruwirth et M. Kraus (*), en Autriche, sont les principaux défenseurs de cette autre théorie, qui construit les abîmes de bas en haut, par affaissement de voûtes dont les eaux intérieures ont ruiné les pieds-droits.

L'ouverture subite, à diverses reprises constatée, de trous au fond desquels on voyait couler l'eau, — les fameux cénotés du Yucatan, la source de Brissac (Les Abîmes, p. 147) et les *light-holes* de la Jamaïque, — les dépressions de la surface du sol dans des régions où l'existence des rivières souterraines est certaine, — les éboulements partiels de voûtes ou parois des cavernes, — la dégradation continue ou inachevée des parois stratifiées d'abîmes, comme le Tindoul (Les Abîmes, p. 246) et la Magdalena-Schacht d'Adelsberg (*ibid.*, p. 445), rendaient jusqu'à un certain point plausible une semblable hypothèse.

C'est par empirisme que mes nombreuses descentes de gouffres en ont prouvé, sinon la fausseté, du moins la non-généralité : un dixième à peine des abîmes explorés s'est montré à nous comme résultant indubitablement de la rupture caractérisée d'une voûte de caverne. Tous les autres sont, comme les grandes *cheminées*, citées plus haut (p. 21), tellement étroits par rapport à leur profondeur, ou tellement coudés et irréguliers, qu'il est matériellement impossible d'y voir des abîmes d'effondrements.

Aussi, tout en tenant pour tels au premier chef les beaux gouffres du Tindoul, de Padirac, de la grotte Peureux (Lot) (Les Abîmes, p. 310), de Marble-Arch (Irlande), de Saint-Canzian (Autriche), etc., m'abstiendrai-je de reproduire ici toutes les raisons qui me les font considérer comme de simples accidents. Ces accidents sont subordonnés au degré de puissance de la rivière souterraine, et d'épaisseur du terrain qui la surmonte (**). Et je m'étonne

(*) M. Kraus a cependant fini par reconnaître qu'il ne faut pas la « généraliser » (Hohlenkunde, p. 63 et 111, etc., etc.).

(**) Les Abîmes, p. 448, 515.



bien que M. de Lapparent, après avoir reconnu, à la suite de mes recherches, que les avens « sont des puits irréguliers, que les eaux sauvages ont creusés en profitant des fissures naturelles du terrain... et qui ne jalonnent pas nécessairement le cours des rivières souterraines » (*), ait semblé revenir en arrière en disant « que la plupart des dépressions de la surface résultent de l'*effondrement* des cavités sous-jacentes (**) ».

La généralisation de la théorie des effondrements a conduit à deux autres hypothèses contre lesquelles je maintiens de plus en plus toutes mes réserves.

**Théorie du jalonnement.** — La première est celle du *jalonnement*, prétendant que, « sous chaque rangée de bétoires (ou gouffres), il existe un cours d'eau permanent ou temporaire, qui les a nécessairement produites » (abbé Paramelle). Ceci a été absolument réfuté par nos descentes : non seulement, comme je viens de le dire, la plupart des abîmes visités sont l'œuvre des eaux extérieures, et non des intérieures, mais encore près des trois quarts n'ont conduit à aucune rivière. Et la majorité de ceux qui nous ont menés à des courants souterrains étaient creusés dans des diaclases greffées sur des galeries profondes, à angle plus ou moins aigu (Rabanel, Mas-Raynal, les Combettes, etc.). Peut-être le défaut de communication *actuelle* provient-il, comme en beaucoup d'endroits du Karst, de ce qu'il y a eu obstruction par les pierres et débris tombés de la surface ; peut-être que les déblaiements auxquels on se livrera un jour ou l'autre, espérons-le, révéleront quantité d'autres cours d'eau mystérieux ; il n'en est pas moins vrai que beaucoup d'abîmes (sur le Causse Noir, par exemple, dans l'Aveyron) se terminent (on l'a vu plus haut) par de vraies fissures capillaires,

(*) Traité de Géologie, 3e édit., p. 204, 1893.

(**) Leçons de géographie physique, p. 230, 1896.

absorbant les eaux infiniment divisées, et sans les transformer en réels ruisseaux ; — qu'ils peuvent être, à raison de leur origine extérieure, indépendants des rivières souterraines ; — et que le principe posé par l'abbé Paramelle exposerait, au point de vue de la recherche de ces rivières, à de singuliers mécomptes.

**Cloups et dolines.** — Une seconde hypothèse me semble non moins hasardée : c'est celle qui trouve des indications d'effondrements souterrains dans une sorte particulière d'excavations dont je n'ai pas encore parlé. Il s'agit des fameuses *dolines* du Karst, autre objet d'interminables controverses ; faute de définition précise, on n'a jamais pu s'entendre sur la valeur précise de ce terme, et on l'a appliqué même aux vrais abîmes. Pour moi, les réelles *dolines* d'Istrie et de Carniole, du moins ce qu'on m'a le plus souvent désigné sous ce nom dans mon exploration du Karst, en 1893, rappellent les *cloups* du Quercy ; les paysans du Lot ont su mieux que personne distinguer des abîmes, qu'ils nomment *igues*, les dépressions rondes ou ovales, dont le vrai caractère est d'être *plus larges que profondes*. C'est à de telles concavités de la surface, larges souvent de plusieurs centaines de mètres (Cloup de Bèdes, dans le Lot, 850 mètres de tour, 250 à 300 de diamètre, 75 de profondeur ; Grande-Fosse et Fosse-Limousine de la Braconne, en Charente ; Risnik-Doline, près Trieste, 260 et 205 mètres de diamètre, 95 de profondeur, etc. ; V. Les Abîmes, p. 306, 381, 471), que je voudrais voir limiter l'obscur terme de *dolines ;* ceci posé, voyons ce qu'on a voulu faire des *dolines*.

M. Kraus, avec plusieurs géologues autrichiens (Tietze, Schmidl, Lorenz, Stache, Pilar, etc.), y voit des effondrements de voûtes de cavernes, dont les débris ont obstrué l'intérieur et interdit l'accès ; bien plus, il admet, avec M. Urbas, que les séries de dolines ou de dépressions alignées à la surface du sol permettent de tracer au dehors



le cours des ruisseaux souterrains (*), et il suppose qu'en en déblayant le fond on arriverait à ces courants. C'est la théorie du jalonnement poussée à l'excès.

Car rien n'a établi que les *dolines*, telles du moins que les restreint la définition ci-dessus, soient des effondrements ; les raisons suivantes prouvent même le contraire.

Les gouffres d'effondrements de Padirac, du Tindoul, de la grotte Peureuse (Lot), de Marble-Arch, etc., loin d'être au fond de dépressions de terrain, s'ouvrent sur des saillies ou des pentes déclives ; — plusieurs *cloups* du Lot se terminent par des *igues* de *creusement superficiel* qui ne présentent aucun caractère d'effondrement (Biau ou Baou, Planagrèze, les Brasconies, etc.), quoique profonds de plus de 50 mètres ; il en est de même de la Kačna-Jama et de plusieurs autres abîmes en Istrie ; — aux environs d'Adelsberg, il y a certainement plusieurs dolines (Stara-Apnenca, Koselivka, Cerna-Jama, etc.) qui correspondent à des effondrements de la grande caverne(**), mais celles-là ont un fond beaucoup plus bouleversé que les autres ; — la plupart, au contraire, possèdent un sol si uni qu'on peut (comme dans les *cloups*) y cultiver des champs nommés *Ogradas ;* il me paraîtrait difficile d'expliquer par une érosion ultérieure, comme a voulu le faire M. Kraus, leur nivellement sur une surface qui atteint parfois plusieurs hectares, si leur origine devait être recherchée dans le cataclysme d'un aussi vaste affaissement ; — les dolines du Karst sont tellement rapprochées les unes des autres entre Adelsberg et Planina, juste au-dessus du cours de la Piuka souterraine, qu'on ne peut

(*) V. pour la bibliographie et la discussion relative aux dolines, les pages 433 et 516 des Abîmes. — Conformément à mes idées, M. de Lapparent a récemment distingué les *larges* dolines ou cloups des étroits et profonds *gouffres* ou *abîmes* (Leçons de géographie physique, p. 230).

(**) Höhlenkunde, p. 62 ; — Les Abîmes, p. 442, 448, 449.

guère faire plus de 1 kilomètre en tous sens sans en trouver une ; or, Schmidl et M. Putick ont remonté le bras de Zirknitz de la grotte de Planina pendant 5 kilomètres, sans rencontrer d'effondrements ; il faut donc supposer que la rivière souterraine circule dans l'intervalle des affaissements imaginés, en les évitant soigneusement ; c'est précisément le contraire de ce qu'on prétend ; — la désobstruction d'une doline (Zvratek) de Moravie, effectuée par M. le professeur Trampler, l'a conduit non pas à une galerie, ni à une caverne éboulée, mais à une étroite fissure verticale, sans trace d'effondrement, et aboutissant à un bassin d'eau de niveau variable (Eröffnung zweier Dolinen ; *Mittheil. geogr. Gesellsch.* de Vienne, n° 5 de 1893) ; — enfin, décisif argument, tout nouveau : il résulte du plan que je viens de refaire à Padirac (28 mars au 1er avril 1896) que le grand dôme de 90 mètres d'élévation est précisément sous un cloup, — que la voûte n'a que 10 à 20 mètres d'épaisseur, — et que le cloup *préexiste à un effondrement qui ne s'est pas encore produit ;* s'il survient jamais, ce qui n'est pas probable (*), le cloup (la doline) disparaitra, au contraire, pour faire place à un vrai gouffre d'effondrement, certainement plus profond (au moins 100 mètres) que large, comme celui qui existe déjà plus au sud et qui sert d'entrée.

Donc la vérité sur les *dolines* ou *cloups* doit être ceci :

1° La distinction n'est pas suffisamment faite, en Autriche, entre les dépressions du sol qui dénoncent un véritable bouleversement de la croûte terrestre et celles qui n'en présentent pas de traces extérieures ;

2° La classification basée sur le diamètre, telle que l'a tentée Cvijić (*Schüssel* ou écuelles, dix fois plus larges que profondes ; *Trichter*, ou entonnoirs, deux ou trois fois plus larges que profonds ; *Brünnen*, ou puits, plus profonds

(*) V. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 21 octobre 1895.



que larges) est trop arbitraire quant aux noms et aux chiffres ; mais le principe en est fort satisfaisant et rationnel ;

3° Les dépressions de taille moyenne à fond chaotique doivent être, au moins dans la région d'Adelsberg, non pas des ruptures absolument verticales de plafonds, mais, à cause de l'inclinaison des strates jusqu'à 45°, des phénomènes de *décollements* (*) tant souterrains que d'infiltration ; le drainage a dû souvent en faire des affluents des rivières souterraines voisines et provoquer leur communication avec elles. — Les autres, aux pentes et au sol moins bouleversés, ont pu être des lacs ou étangs, que des fissures aujourd'hui bouchées ont sans doute drainées aussi vers les courants souterrains avoisinants, mais *pas forcément sous-jacents*. « Par le fait de ces engouffrements, dit très justement M. de Lapparent, le travail extérieur des eaux courantes est presque partout entravé, de sorte qu'on peut dire que la caractéristique d'un tel pays est que le modèle en est inachevé, la plupart des vallées secondaires n'étant qu'ébauchées » (Géographie physique, p. 87). Quant à l'origine première de telles dépressions, il faut la dire jusqu'à présent inexpliquée, et la rechercher probablement moins dans des phénomènes de dénudation superficielle, que dans des faits d'ordre tectonique se rattachant aux plissements de l'écorce terrestre, à la genèse des lacs eux-mêmes, des bassins fermés ou vallées-chaudrons (*Kessel-Thäler*) (**) du Karst, d'Irlande,

(*) V. Les Abîmes, p. 445, 449, 521.

(**) V. Parandier, *Bulletin de la Société géologique*, 3e série, t. XI, p. 441, 7 mai 1883 ; — Martel, Les Abîmes, p. 541-42 ; bibliographie ; — V. De la Noe et de Margerie, Les Formes du terrain, p. 157. «Un synclinal n'est pas nécessairement continu dans son allure... Son axe peut offrir des bombements qui le diviseront en un chapelet de bassins indépendants. Alors il s'y établit des *lacs tectoniques*, déterminés par une dépression préexistante » (lacs du canal Calédonien, en Ecosse) (De Lapparent, Géographie physique, p. 120).

du Jura, des Causses, des fjords de Norvège, etc. C'est un difficile problème que je n'ai pas abordé.

Dans sa Höhlenkunde (p. 114), M. Kraus semble avoir voulu amender sa théorie des effondrements : il explique comment la rupture de voûte de la toute petite grotte de Lantscharieuz est due à la dénudation superficielle, ainsi que diverses autres du même genre (dans le massif du Dachstein), et il ajoute que « les phénomènes du Karst ne peuvent s'expliquer que par les effets combinés de l'érosion superficielle et de l'érosion souterraine ». Voilà qui m'eût mis d'accord avec lui, si, dans une note toute récente (*) sur le même sujet, il ne disait : « La limite où cesse la grotte et où commence la doline est particulièrement difficile à tracer ; car des effondrements de grottes résulte cette sorte de dépressions que l'on désigne comme vraies dolines (**), à la différence des *entonnoirs du Karst* (Karst-Trichter), qui se forment en si grand nombre dans le Karst aux orifices de cavernes conduisant dans les profondeurs. » Quand nous aurons ajouté que ces cavernes profondes (Les Abîmes français) portent encore une troisième désignation : *jamas*, en slovène, et *Schacht* (*Schächte*, puits de mine), en allemand, on avouera que toutes ces nomenclatures et distinctions sont véritablement bien subtiles et obscures.

M. Kraus propose, d'ailleurs, un assez bon moyen de reconnaître les dépressions qui peuvent être formées par des affaissements de cavernes : c'est de rechercher si leurs parois présentent des traces de revêtements stalagmitiques, qui se dégradent moins vite à l'air que la roche calcaire ordinaire. Au pont d'Arc et le long du cañon de l'Ardèche, j'ai observé ainsi des restes de stalactites, et j'en ai conclu

(*) Zerstörte Höhlen (grottes détruites), *Œsterreichische Touristen Zeitung*, de Vienne, 15 avril 1896.

(**) V. aussi Hohlenkunde, p. 119.



(Les Abîmes, p. 104) que certaines parties de cette vallée ont pu être jadis des cavernes ; le critérium me paraît assez positif.

La question des *vallées inachevées* pourrait être très fructueusement étudiée dans l'Irlande occidentale.

En juillet 1895, j'ai soigneusement examiné à ce point de vue le cours de la curieuse rivière de Gort (comté de Galway), citée par MM. Daubrée (Eaux souterraines, p. 353) et Kinahan (Valleys, p. 148), et figuré les détails de ces accidents (Voir *fig.* 1, Pl. II).

Le Lough (lac) Cooter est à l'altitude de 35 mètres. La première perte de la rivière *Beagh*, qui en sort, s'effectue à 30 mètres (*), parmi des crevasses impénétrables, encombrées de terre, de pierres et de branchages, au pied d'un petit cirque profond de 17 mètres, dont les pentes éboulées ne sont retenues que par une très vive végétation ; c'est, en beaucoup plus pittoresque et avec un bien plus gros volume d'eau, la répétition de la Perte de l'Hôpital d'Issendolus (Lot) (V. Les Abîmes, p. 294) ; sur une ligne de 1.350 mètres, sinueusement développée à la surface du sol, il y a cinq effondrements, qui sont bien des regards ouverts sur et par le courant souterrain et que l'on nomme en Irlande des *sluggas ;* le premier n'a qu'une dizaine de mètres de profondeur sur une quarantaine de diamètre et n'arrive pas jusqu'à la surface de l'eau ; tous les autres laissent voir un instant dans leur fond le courant sombre ; le deuxième, nommé le *Devil's-Punch-Bowl* (Bol à Punch du Diable), est le plus régulier et profond de 15 mètres ; — le troisième, *Black-Water* (Eau Noire), le plus allongé, constitue un grand fossé, courbé du Sud au Nord-Ouest, long de près de 200 mètres, profond de 15 à 20 et large de 20 à 40 ; il est rempli

(*) Ces altitudes, exactes, sont déduites tant de la carte au 10.560e que de mes observations barométriques repérées d'après cette carte.

d'arbres et entouré d'un mur pour empêcher les accidents; on y peut descendre jusqu'au bord de la rivière, qui y coule à l'air libre, réapparue, puis réengloutie aux deux extrémités opposées sous des strates rocheuses siphonnantes; impossible de la suivre sous la terre; — les deux derniers trous, nommés *Ladle* (la Cuiller) et *Churn* (la Baratte), sont moins importants. — Tous ont, en résumé, la plus parfaite analogie avec les Cénotés du Yucatan, ouverts par affaissement de voûtes au-dessus des eaux souterraines (V. Les Abîmes, p. 147; Reclus, XVII, p. 242).

La caverne de *Pollduagh*, où renait, pour couler serpentiforme et à l'air libre pendant 6 kilomètres, la rivière de Gort, ou rivière *Cannahowna*, n'est pénétrable que sur une dizaine de mètres; le courant s'en échappe également par un siphon, à 26 mètres d'altitude, sous un auvent de roche haut de 6 mètres (V. la coupe *fig.* 1, Pl. II). Elle s'est donc abaissée de 4 mètres sur un parcours caché de 1.350 mètres, soit 3 pour 1.000, ce qui est fort peu, car les pentes des rivières souterraines que j'ai étudiées ailleurs varient de 6 à 150 pour 1.000 (V. Les Abîmes, p. 70).

C'est dans plusieurs *Sauglöcher* (suçoirs) ou *bétoires*, au milieu de prairies, que s'opère presque insensiblement la nouvelle disparition de la rivière, au pied de la jolie ruine du château de Castletown et du talus du chemin de fer, entre les stations de Gort et d'Ardrahan, à 12 mètres d'altitude. A 1.100 mètres au Nord-Ouest, dans le beau parc privé de Coole, derrière le village de Kiltartan, une source de fond, *Polldeelin*, analogue au Loiret, ramène une fois de plus le courant au jour, à 10 mètres d'altitude. A moins de 500 mètres plus loin, elle disparait, pas pour longtemps, et seulement sous une assise de strates calcaires fissurées, affaissées, mais pas encore emportées par le courant; superficiellement, ce « pont naturel », ainsi



qu'on le nomme trop pompeusement, est un irrégulier dallage carré de 10 mètres environ de côté; il est si bien immergé dans l'eau qu'il ne forme nullement une voûte; c'est plutôt un barrage qu'un pont, mais un barrage tellement disloqué que la rivière passe à travers et non par dessus, en attendant qu'elle l'ait complètement ruiné et emporté. On retrouve le même phénomène dans le Yorkshire, à God's-Bridge (près Ingleton) au pied occidental d'Ingleborough Hill.

A moins de 200 mètres plus loin, se trouve une cinquième perte (*), pareille à la première de toutes; l'altitude n'est plus que de 9 mètres, et le courant se précipite violemment dans un trou terreux, comme la perte du Bandiat *chez-Roby* (Charente). Des bois flottés et des flocons d'écume tournoient lentement et sans arrêt dans un large bassin naturel qui précède l'entonnoir.

La dernière réapparition se fait voir à 350 mètres de là, toujours dans le parc de Coole.

Enfin, la rivière court libre, mais pour 2 kilomètres seulement, car le lac *Coole* (Coole-Lough; altitude, 8 mètres) l'arrête au passage et, comme il n'a point d'émissaire aérien, elle est contrainte encore « de chercher sa route par les passages souterrains du lac Caherglassaun (**) vers la mer à Kinvarra, où une partie tout au moins de ses eaux trouve une issue par les joints des rochers dans le voisinage de Dungory-Castle » (Kinahan, *op. cit.*, p. 149).

Dungory-Castle est à 8 kilomètres au nord-ouest de Coole-Lough, ce qui ne donne plus que 1 pour 1.000 de

(*) Sans considérer comme tels les *regards* de Punch-Bowl, Ladle et Churn.

(**) D'après le County Map au 10.560e le niveau de Coole-Lough a été de 29 pieds en janvier 1838 et de 16 pieds en mai 1838, celui de Caherglassaun-Lough, de 13 pieds en juin 1838 et de 26 pieds en février 1839 (le pied est de 0m,30479).

pente à l'écoulement souterrain entre ces deux points.

La pente et l'altitude de la rivière de Gort, et, par conséquent, la force de son courant sont tellement faibles qu'elle n'a pas eu l'énergie mécanique nécessaire pour détruire complètement les digues successives (qu'elle a simplement percées) ni pour transformer en vallée parfaite les portions souterraines de son cours. Il n'est donc pas probable qu'elle ait pu déblayer en très large vallon, sur 6 kilomètres d'étendue, une ancienne caverne, pour en faire le *Kesselthal* de Gort : et tout indique que cette vallée fermée est bien réellement une vallée inachevée, de même que le bassin clos et presque circulaire du parc de Kiltartan.

Ainsi la rivière de Gort montre donc juxtaposés les deux phénomènes : 1° d'effondrements de cavernes tendant au creusement d'un thalweg ; 2° de vallée fermée d'origine tectonique que le ruissellement et l'érosion superficiels n'ont pas pu achever, à cause de la fissuration des formations environnantes.

Toute cette portion de l'Irlande (les *Burrens*) présente plusieurs dispositions analogues entre Galway et l'estuaire du Shannon.

**Vallées formées par des effondrements de cavernes.** — Quelque restriction qu'il faille donc apporter à la généralisation à outrance de la théorie des effondrements intérieurs, il faut cependant encore reconnaître que diverses localités montrent l'énorme influence qu'ils ont exercée parfois sur la surface du sol : ainsi que je l'ai admis moi-même, à la suite de ma première exploration souterraine, celle de Bramabiau, en 1888, il y a des cas où la propagation des effondrements successifs au-dessus du cours d'une rivière souterraine a pu arriver jusqu'au creusement d'une véritable vallée ; et je persiste à penser que, pour les étroits cañons sinueusement creusés dans la masse des régions calcaires, « la première phase de la formation n'a



pas consisté dans le simple sciage vertical par des rivières creusant leur lit de plus en plus, mais bien dans le développement, puis l'écroulement des cavernes (*)..., écroulements qui ont tracé le sillon originaire, l'amorce des cañons actuels ».

Il n'y a pas contradiction entre cette doctrine, qu'il ne faut pas d'ailleurs développer non plus avec exagération, et l'opposition que je viens de faire à la théorie de M. Kraus sur les dolines : j'ai admis, en effet, que beaucoup de ces dernières sont dues à des affaissements de plafonds caverneux ; je demande seulement que l'on ne regarde pas chaque cloup ou doline comme marquant infailliblement la place d'un tel affaissement ; je demande surtout que les *bassins fermés* (du Jura), les *Kessel-Thäler* (d'Autriche), les *Polje* (de Dalmatie, Bosnie, etc.), ne soient pas considérés aussi comme de purs et simples effondrements (**) : leur largeur, atteignant souvent plusieurs kilomètres, rend une telle origine invraisemblable (***). Les amples dépressions du lac de Zirknitz, d'Adelsberg, de Planina, de la Foiba de Pisino, sont bien des vallées inachevées, et non d'anciennes cavernes affaissées ; le développement du *thalweg* s'y est arrêté au point où la fissuration du sol assurait un écoulement souterrain suffisant.

Bien plus étroits et plus allongés sont les vallons et ravines réellement dus à des ruptures de voûtes ; les suivants, dont la transformation de rivières souterraines en thalwegs ouverts n'est pas encore complète, ont indéniablement ce caractère :

---

(*) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 3 décembre 1888.

(**) « Les Kesselthäler peuvent être aussi comptés parmi les dolines. La différence consiste simplement en ce que les dolines sont formées par effondrement d'un seul coup, tandis que les Kesselthäler résultent d'effondrements successifs et d'agrandissements superficiels ultérieurs » (Kraus, Hohlenkunde, p. 119, 140 et suiv.).

(***) V. Les Abîmes, p. 541.

*Bramabiau*, dans le Gard, avec son tunnel d'entrée, son aven d'effondrement, ses éboulis intérieurs, ses 6.300 mètres de galeries obscures et sa profonde alcôve de sortie, le tout sous une bande de terrain large de 500 mètres et et avec une dénivellation de 90 mètres (*).

*Saint-Canzian im Wald* et *Saint-Canzian am Karst*, tous deux près d'Adelsberg : le premier avec cinq ou six vraies dolines d'effondrement, profondes de 60 mètres et larges seulement de 5 à 50 mètres ; — le second, avec deux des plus grandes dolines connues, larges de 400 mètres, profondes de 110 à 160 (les fragiles ponts naturels restés en place dans ces extraordinaires localités (**) sont les *témoins des anciennes* voûtes en grande partie écroulées) ; — le *Rummel*, à Constantine, avec ses quatre arcades restées debout sur 300 mètres de parcours seulement (Reclus, Géographie, t. XI, p. 417) ; — les *Sluggas de Gort*, dont je viens de parler.

Les *Tomeens*, sur la rivière Ardsollus, près Tulla, en Irlande, succession de petits tunnels séparés par des tranchées naturelles sur 5 ou 600 mètres de longueur, ne sont absolument qu'une caverne en démolition ; je me suis rendu compte, en juillet 1895, que les tunnels représentent les restes des voûtes du conduit souterrain primitif (***) ; les strates, tombées de leurs ouvertures au fond des tranchées, dans le lit même de la rivière, laissent surprendre sur le fait le mode d'affouillement des calcaires par les eaux.

Enfin, à *Marble-Arch* (Irlande), les quatre effondrements pratiqués à la sortie même de la source montrent que le vallon de la Cladagh s'agrandit ici d'aval en amont ; nulle part l'œuvre de sape d'une rivière souterraine

(*) *Bulletin de la Société de géographie de Paris*, 1er trimestre 1893 ; et Les Abîmes, chap. IX.

(**) Les Abîmes, p. 459 et 465 ; — *Le Monde moderne* (Revue Quantin), octobre 1895.

(***) V. *la Nature*, n° 1187, 29 février 1896.



n'est plus certaine et plus parlante que là ; et les partisans de la théorie qui attribue l'origine des puits naturels principalement à cette cause trouveront à Marble-Arch un des meilleurs arguments à l'appui de leur thèse. Ils devront remarquer, toutefois, que le peu d'épaisseur du terrain superposé à la caverne (15 à 40 mètres au plus) est une circonstance particulièrement favorable à la production des affaissements, et que, conformément à la distinction que j'ai établie dès 1889 (*) et qui se trouve ici confirmée, les conditions ne sont plus du tout les mêmes, quand cette épaisseur dépasse 100 mètres : en ce cas, les abîmes étroits, verticaux et profonds de 100 à 300 mètres, dus surtout à l'action extérieure des ruisseaux qui s'y engouffraient (Karst, Causses, Vaucluse, etc.), se montrent bien plus fréquents que les vrais gouffres d'effondrements ; ceux-ci ne sont alors que des exceptions dont les dolines de la Recca à Saint-Canzian am Karst (Istrie), Padirac (Lot), et peut-être la Mazocha (Moravie), sont les types extrêmes (profonds de plus de 100 mètres).

Les sept exemples que je viens de citer mettent hors de doute que la démolition des cavernes et l'effondrement de leurs voûtes ont pu efficacement concourir à la formation des vallées.

Et ce qui concerne la manifestation de ces affaissements à la surface du sol doit, selon moi, se résumer ainsi : il y a des abîmes, des dolines et des vallées d'effondrements, mais ni les larges et peu profondes dolines ou vallées, ni les étroits et très profonds gouffres, ne sont, en général, dus à des affaissements de voûtes de cavernes.

Et, par-dessus tout, *aucune théorie n'est universelle en ce qui concerne l'origine des cavernes :* chacune de celles qu'on a proposées a été, en général, trop exclusive ; presque toutes sont partiellement justes ; l'absolue vérité

(*) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 14 octobre 1889.

réside tantôt dans leur combinaison, tantôt dans l'application de l'une ou de l'autre suivant les cas particuliers. Mais revenons à la circulation de l'eau souterraine, dont nous ont écartés les abîmes et les dolines.

*Écoulement de l'eau à l'intérieur des terrains fissurés.* — Nous avons à considérer en second lieu :

2° Le mode d'écoulement et de propagation de l'eau à l'intérieur des terrains fissurés.

On sait quelle distinction a été établie par MM. Delesse, Daubrée, Ed. Dupont (*), de Lapparent et par moi-même (Les Abîmes, p. 537 et 554), entre les terrains meubles, fragmentaires, ou incohérents, et les terrains fissurés : dans les premiers, l'*imbibition* de toute la masse donne naissance à de vraies nappes d'eau ; dans les seconds, le *suintement* ne pouvant se produire que par les fentes naturelles, et l'eau ne pénétrant pas les blocs compacts délimités par ces fentes (si ce n'est dans la très petite proportion de l'*eau de carrière* introduite par la capillarité), il y a un réseau de canaux confluant des plus petits aux plus grands : j'ai tellement détaillé, dans mes précédentes publications tous ces modes de circulation des eaux souterraines des terrains fissurés, en tout comparables à ceux des ruisseaux et rivières de la surface, ou au système d'égouts (gouttières et collecteurs) d'une grande ville, que j'abuserais vraiment en les décrivant une fois de plus.

**Absence des nappes d'eau.** — J'insisterai seulement de nouveau, avec M. Daubrée (Eaux souterraines, t. I, p. 18) pour demander la proscription, en de pareils terrains, du terme de *nappe d'eau :* il n'y a pas, dans les terrains fissurés, de *nappe* continue ; la légende de la feuille Forcalquier de la carte géologique au 80.000e est fautive

(*) Delesse, Recherches sur l'eau dans l'intérieur de la terre ; *Bulletin de la Société géologique*, 4 novembre 1861, 2e série, t. XIX, p. 64 ; — Dupont, Phénomènes des cavernes, p. 13.



quand elle dit que la fontaine de Vaucluse est alimentée par une *nappe* souterraine : *cela est inexact.* Vaucluse est le débouché d'un *fleuve* formé sous la terre par la convergence d'innombrables ruisseaux intérieurs drainant, par les avens et fissures du sol, toutes les eaux des plateaux de Saint-Christol, Banon, Sault, etc. Il ne faut plus qu'on parle du *grand lac souterrain* alimentant les sources du cañon de l'Ardèche ou de la Touvre (Les Abîmes, p. 118, 172, 526, 529, 533). Je ne cesserai pas de combattre cette malencontreuse expression, qui fausse absolument les idées et les recherches. D'après M. Kraus, (Höhlenkunde, p. 137), la Compagnie du chemin de fer de Karlstadt à Fiume, en Croatie, aurait dépensé 30.000 florins à forer des puits pour trouver de l'eau, qui ne s'est pas rencontrée — Aux environs de Châlons-sur-Marne, le niveau de l'eau varie considérablement entre des puits très rapprochés (Daubrée, Eaux souterraines, t. I, p. 198). — « Si une mauvaise chance vous fait tomber sur une portion de la roche calcaire bien compacte, vous avez exécuté un travail inutile » (Arago, Notice sur les puits artésiens, 1835). Dans un récent et important mémoire sur la nitrification et la pureté des eaux de sources (*), M. Th. Schlœsing a dit que, pour les terrains fissurés « la nappe souterraine est discontinue, au lieu d'être continue ». Ce correctif n'est pas suffisant encore : il faut dire que, dans ces terrains, les *courants* et les *poches* remplacent les nappes. Mais je ne veux pas me laisser de nouveau entraîner à une démonstration que je considère comme irréfutable, après tout ce que j'ai vu et décrit sous terre (galeries de Padirac, de la Baume de Sauvas, de la Recca, etc). Les plus grands *lacs* ou nappes d'eau des cavernes n'atteignent pas 100 mètres de *largeur ;* la longueur, la hauteur et l'étroitesse l'emportent toujours

(*) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 13 avril 1896.

de beaucoup. Comment expliquer sans cela les énormes dénivellations, les considérables ascensions d'eau que l'on a observées dans des puits tantôt absorbants, tantôt jaillissants, comme les Sauglöcher de Zirknitz et le puits de la Brême (Jura), — à Trebič (Istrie ; profondeur, 322 mètres), où l'on a vu la rivière souterraine s'élever de 119 mètres en octobre 1870 et de 96 mètres le 30 octobre 1895 — aux Vitarelles (Lot; profondeur, 85 mètres), quelquefois à moitié pleines d'eau ; — à la Mazocha (Moravie ; profondeur, 136 mètres) où l'eau monte de 30 à 35 mètres, etc. ; — aux *turloughs* d'Irlande ; — à la Kačna Jama (Istrie).

*Issues des eaux. Sources.* — 3° Le mode de sortie des eaux souterraines sous forme de sources ne nous arrêtera pas non plus bien longtemps. Il est établi maintenant que, presque partout, le parcours des rivières souterraines des terrains fissurés est entravé par des siphons naturels ; ils se manifestent sous la forme de voûtes *mouillantes*, c'est-à-dire de murailles rocheuses immergées dans l'eau sur une profondeur et une épaisseur variables, généralement impossibles à déterminer.

Ces siphons, véritables vannes fixes, de section restreinte, régularisent dans une certaine mesure le débit des eaux souterraines, qu'ils retiennent pour partie dans les réservoirs ou espaces libres situés en amont.

**Sources vauclusiennes.** — On a donné le nom de sources *vauclusiennes* aux fontaines des terrains fissurés qui, comme Vaucluse, jaillissent directement d'un tel siphon.

J'ai expliqué déjà (*) comment l'emploi de ce terme, à titre générique, n'est pas justifié, et j'ai donné les plans et coupes d'un certain nombre de siphons que j'ai trouvés désamorcés. J'ai signalé aussi divers siphons dont la disposition permet d'espérer que, dans beaucoup de cas, il suffirait sans doute, pour dépasser l'obstacle d'un siphon et retrouver l'espace libre au delà, de percer quelques mètres de roche normalement aux plans des diaclases ou fissures utilisées par l'eau (*). Cela permettrait même peut-être de rendre plus efficace le rôle de régulateurs dévolu à ces rétrécissements sous-aqueux, si, connaissant leurs figure et dimensions exactes, on pouvait, par quelques travaux artificiels, les transformer en vannes mobiles et les asservir ainsi complètement à divers besoins économiques.

(*) Les Abîmes, p. 553.



Le plus curieux siphon, à ce point de vue, est celui que j'ai découvert à la source de Marble-Arch, le 16 juillet 1895 (**) ; la source aérienne de la Cladagh, l'orifice ou tête d'aval du siphon se trouve à moins de 5 mètres de distance du dernier bassin souterrain, ou tête d'amont ; la roche compacte, sous laquelle l'eau filtre, n'a pas 5 mètres d'épaisseur ; l'eau passe par quelque joint entre deux strates qui n'ont pas encore été emportées par le courant ; nulle part je n'ai constaté, jusqu'à présent, une aussi faible solution de continuité dans le fil souterrain de l'eau, une aussi petite distance entre les deux surfaces libres du vase communiquant. Cela prouve péremptoirement que le bloc de rocher ainsi laissé en place entre deux diaclases, et immergé dans l'eau, où il s'enfonce comme un tenon dans une mortaise, peut très bien faire siphon avec une fort médiocre épaisseur. Il est vrai que les bassins formés de part et d'autre de ces siphons peuvent atteindre une respectable profondeur. J'ai trouvé 9$^{m}$,50 à la source Saint-Georges, près Meyraguet (Lot); 6 mètres au fond de Padirac ; 6 mètres à l'Écluse (Ardèche); 13$^{m}$,50 à la Foiba-di-Pisino (Istrie); etc. M. Marinitsch a mesuré 13 mètres au lac de la Mort,

(*) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 18 mai 1896.
(**) V. *Annuaire du Club alpin français* pour 1895.

fin de la Recca de Saint-Canzian ; Schmidl, 13m,60 au lac des Protées de Planina, et M. Putick, 15 mètres au même endroit. En 1878, l'expérience du plongeur Ottonelli, dirigée par M. Bouvier, a prouvé que le siphon de la source de Vaucluse a au moins 30 mètres de profondeur. Celui de Trébic, à l'étiage, arrive à 21 mètres de profondeur, soit à 2 mètres au-dessous du niveau de la mer (*).

Et remarquons que, derrière le siphon de Marble-Arch, dont de bienheureux effondrements m'ont permis d'examiner le réservoir d'amont, ce n'est pas une *nappe d'eau* que j'ai trouvée, mais bel et bien une rivière courante, où mon bateau a pu flotter pendant plus de 500 mètres.

Je reviendrai dans ma seconde partie sur le fonctionnement des siphons souterrains, et je n'ai plus que deux ou trois remarques à faire sur les sources des terrains calcaires.

**Fausses sources.** — J'ai indiqué, avec M. Édouard Dupont (**), qu'il ne fallait pas considérer comme des sources proprement dites les rivières qui, formées à l'air libre et perdues dans des *goules*, reparaissent après un plus ou moins long parcours souterrain, comme la Lesse à Han, la Piuka à Planina, la Punkwa en Moravie, la Buna à Blagaj (Herzégovine), l'Ombla à Raguse (Dalmatie), la plupart des Kephalovrysis (sources) de Grèce, le Clapham-Beck à Ingleborough, la Cladagh à Marble-Arch, etc. (***). M. Schlœsing, dans le mémoire cité ci-dessus, a sanctionné cette distinction entre les vraies et les fausses sources et montré quelle importance elle présente, au point de vue hygiénique, pour la filtration et la pureté des eaux (****).

(*) *Spelunca*, n° 4 (1895), p. 148.

(**) Ed. Dupont, *Bulletin de la Société belge d'hydrologie*, t. IV, 15 juillet 1890, p. 205 ; — Martel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 21 mars 1892 ; — Les Abîmes, p. 549, 532.

(***) Les Abîmes, p. 553.

(****) V. aussi ma note sur la *contamination des sources de terrains calcaires*. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 21 mars 1892.



**Rivières souterraines sans siphons.** — Quelques cavernes sont traversées par l'eau sans siphons interposés, mais elles sont rares, et les principaux exemples sont le Mas d'Azil et Bramabian, en France; Douboca, en Serbie (*); Esetate-Boli, en Transylvanie (**); les grottes de Pung et du Nam-Hin-Boune, en Indo-Chine, etc.

**Sources intermittentes régulières.** — Enfin, les sources intermittentes dites *régulières* ou *périodiques*, ou à jaillissements également espacés, demeurent encore énigmatiques; toutes sont trop étroites, ou au moins trop dangereuses, pour être explorées à l'intérieur ; on reste réduit, sur leur mécanisme, à l'hypothèse du jeu de siphons d'inégaux diamètres, séparés par des réservoirs se vidant plus vite qu'ils ne se remplissent.

**Sources intermittentes irrégulières.** — Les autres sources intermittentes, *irrégulières* ou *temporaires*, sont généralement les trop-pleins de sources voisines ou peu éloignées.

Je m'en occuperai aussi dans la seconde partie, et je résume ce qui concerne le rôle hydrologique des cavités naturelles du sol en disant que *les eaux d'infiltration sont absorbées par les abîmes et autres crevasses superficielles, emmagasinées par les cavernes et débitées par les sources.*

Recherches diverses a effectuer. — Je n'ai rien à ajouter à ce que l'on sait déjà ou à ce que j'ai précédemment écrit sur les recherches paléontologiques effectuées ou restant à effectuer sous le talus d'éboulements des abîmes, — sur l'origine des phosphorites du Quercy dans les crevasses des Causses de Tarn-et-Garonne, des phosphates d'alumine de Minerve, — sur les glacières naturelles et les diverses théories dont elles ont été l'objet, — sur les documents

(*) V. *Spelunca*, n° 3 (1895), par le Dr Cvijić.

(**) Kraus, Höhlenkunde, p. 59-60.

stratigraphiques que fourniront les belles coupes naturelles des abîmes, — sur les observations d'ordre tectonique que peuvent provoquer les parois disloquées et contournées de gouffres tels que ceux des Vitarelles, des Besaces et d'Arcambal (Lot), de Saint-Canzian (Istrie), etc., — sur l'étude et l'emploi des substances diverses contenues dans les cavernes (argiles, phosphates, salpêtre, guanos, etc.), — sur l'analyse chimique de leurs eaux, — sur l'utilité, pour les ingénieurs, de connaître les vides existants, afin de n'en être point gênés dans l'exécution des travaux publics, — sur l'utilisation et l'aménagement industriels des cavités souterraines et de leurs réservoirs d'eau, — sur la protection des sources contre la contamination dans les terrains fissurés, — sur la désobstruction des Katavothres et la suppression des marais en Grèce, — sur les expériences de pesanteur et d'électricité à tenter dans les abîmes et cascades souterraines. — Tout un programme d'intéressantes recherches nouvelles est tracé maintenant, grâce aux récents progrès de la spéléologie; depuis dix ans, ces progrès ont rompu le charme de terreur, qui jusqu'alors avait écarté l'homme des profondeurs aujourd'hui parfaitement, sinon facilement, accessibles !

---

## DEUXIÈME PARTIE.

### VARIATIONS CLIMATÉRIQUES DES CAVERNES.

La météorologie des cavernes n'a été jusqu'ici l'objet que de très insuffisantes recherches.

Pression atmosphérique. — Pour la pression de l'air, je ne connais qu'une expérience scientifique, celle d'Adolf Schmidl, à Adelsberg : pendant vingt-quatre heures



(14-15 septembre 1852), il fit des observations horaires du baromètre dans l'intérieur de la grotte, tandis que M. Schinko se chargeait des lectures correspondantes au dehors dans le bourg même; la conclusion générale fut que la pression était plus forte et ses variations un peu plus amples dans la caverne.

Le temps m'a toujours fait défaut pour exécuter, dans les conditions voulues, des observations de ce genre. J'ai deux remarques seulement à produire.

La première c'est que, dans tous les abîmes verticaux où les mesures directes ont été possibles, les indications du baromètre ont bien coïncidé avec celles des sondages à la corde; il est vrai que, dans ces puits droits, l'air extérieur arrive directement au fond. A Jean-Nouveau, par exemple, le baromètre indiquait de 160 à 165 mètres de profondeur, et la corde, 163 mètres; à Padirac, la moyenne de toutes les lectures est 103 mètres, chiffre du sondage.

**Anomalies observées.** — La seconde, c'est que les deux cavernes où je suis le plus fréquemment descendu (Dargilan sept fois, et Padirac six fois) m'ont, à plusieurs reprises, montré des anomalies barométriques tout à fait inexplicables. A Dargilan, notamment, l'une d'elles s'est répétée deux fois dans la grande galerie; elle me faisait trouver une profondeur de 130 mètres en 1889 et de 80 mètres en 1896, au lieu de 55 mètres en 1892 (même instrument en 1892 qu'en 1896). Ce dernier chiffre est bien approché de la vérité, puisqu'en 1895 M. Carrière, géomètre expert, dans le travail de précision dont il a été chargé par le tribunal du Vigan, au cours d'un procès, a trouvé $57^{m},81$.

Je ne puis imputer à des erreurs de lecture ces accidents réitérés dans des mêmes localités: mais, faute de précision suffisante, je dois me borner à attirer l'attention sur cette question.

TEMPÉRATURES. — *Nouveaux principes reconnus.* — Pour les températures de l'air et de l'eau des cavernes et des sources, au contraire, j'ai pu formuler, à l'aide de plus d'un millier d'observations, les nouvelles données suivantes : 1° la température de l'air des cavernes n'est pas constante ; — 2° elle n'est pas uniforme dans les diverses parties d'une même cavité ; — 3° celle de l'eau y est sujette aux mêmes variations et dissemblances ; — 4° elle diffère souvent de celle de l'air ; — 5° les rivières englouties dans les cavernes peuvent y produire, de l'été à l'hiver, des variations importantes, plus faibles cependant que celles de l'air extérieur ; — 6° la température des sources n'est pas toujours égale à la température moyenne annuelle du lieu ; — 7° dans les abîmes verticaux, communiquant librement avec le dehors, il se produit une opposition complète entre la température de la saison chaude et celle de la saison froide, sous l'influence de la température externe (*).

*Anomalies géothermiques dans les abîmes.* — Je n'ai jamais vu, même à Rabanel, Vigne-Close, Jean-Nouveau, Viazac (tous profonds de plus de 150 mètres), la température augmenter, comme dans les mines et les tunnels, avec la profondeur. Cela tient sans doute à l'extrême fissuration du calcaire et à la densité de l'air froid, qui tend toujours à se précipiter dans les fissures.

Cependant deux faits contraires ont été récemment observés dans le Karst autrichien.

A l'abîme de *Kluc* (Bassoviza, près Trieste), le 1er novembre 1894, les premiers explorateurs (MM. Petritsch, Perko, Citter, etc.) ont trouvé : 2°,5 C. à l'extérieur ;

(*) V. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 12 mars 1894, 13 janvier 1896, 20 avril 1896 ; — et Les Abîmes, p. 391, 483, 485, 575 et 562.



12°,5 à 25 mètres de profondeur ; 15° à 90 mètres ; 17° à 170 mètres ; 19° à 226 mètres (*).

Dans l'abîme du *cimetière*, près Bassovizza également, M. E. Boegan a observé, le 9 février 1896 : 9° C. à l'extérieur, 18° à 115 mètres, au fond du grand puits absolument vertical, 13°,5 à 201 mètres à l'extrémité de la galerie, longue de 181 mètres et inclinée à 30°, qui fait suite au puits (cette deuxième observation a été contestée).

La moyenne annuelle de la localité est d'environ 10° (**).

La raison de ces réchauffements est inconnue. Peut-être existe-t-il dans le voisinage une source thermale ignorée, comme le supposait Marcel de Serres à propos des trous de Monteils, près de Montpellier (***). Peut-être le calcaire est-il là moins fissuré et s'oppose-t-il à la descente de l'air froid en hiver. Il sera utile de multiplier les renseignements sur ce point. Les anomalies géothermiques des cavernes profondes méritent d'être étudiées.

ORIGINE ET VARIATIONS DE L'ACIDE CARBONIQUE. — Une des curieuses variations à examiner, dans les cavernes, est celle du niveau de l'acide carbonique, dans les rares endroits où on l'a rencontré ; elles dépendent sans doute des changements qui affectent la pression atmosphérique.

Le *Creux de Souci* de la coulée du Puy de Montchal (derrière le lac Pavin), en Auvergne, a montré ainsi les plus curieuses fluctuations dans sa couche d'acide carbonique : Gaupillat, Delebecque et moi avons été arrêtés à 4 mètres du fond le 19 juin 1892 ; dans le second semestre de cette année-là, M. Berthoule y descendait sans encombre à

(*) V. *Spelunca*, n° 1 (1895), p. 43.
(**) *Spelunca*, n° 5 (1896), p. 43.
(***) V. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 29 mai 1837 ; — et Essai sur les cavernes à ossements, p. 29 (3e édit.).

quatre reprises; une cinquième fois, le 10 août 1893; puis, le 18 août 1893, une véritable éruption d'acide carbonique se manifestait à l'orifice du gouffre (*).

Au gouffre de Roque-de-Corn sur le Causse de Gramat, M. Lalande retrouvait, le 3 octobre 1891, l'acide carbonique qui nous avait empêchés, le 12 septembre 1890, de pénétrer dans une poche latérale de la caverne; le 30 septembre 1895, l'obstacle avait disparu, et j'ai pu pénétrer dans cette poche profonde de 3 mètres; elle mène à une galerie basse horizontale, où l'affaiblissement de ma lumière et la difficulté de respiration trahissaient encore l'acide carbonique; il avait donc baissé, sans disparaître complètement. Au bout de la caverne, le siphon terminal, qui arrête la marche, avait baissé également. Quelle relation peut-il exister entre ces deux manifestations?

L'acide carbonique a encore été rencontré à la source de Mayaguar et à la goule de Foussoubie (Ardèche), ainsi que dans les Katavothres du Dragon, de Verzova et de Spilia-Gogou (Péloponèse) (**). Dans ces trois dernières localités, son origine paraît due à la décomposition de matières végétales entraînées par les eaux; au Creux de Souci, c'est une mofette, reste de l'ancienne activité volcanique; à Roque-de-Corn et dans l'Ardèche, elle demeure inexpliquée.

VARIATIONS DU NIVEAU DES EAUX. — Ce qui varie le plus, en somme, dans les cavernes, c'est le niveau de leurs eaux.

On a vu plus haut que ces eaux y pénètrent de deux façons différentes : goutte à goutte, par le suintement des voûtes; à flots plus ou moins abondants, par les absorptions de ruisseaux.

(*) V. Les Abîmes, chap. XXII ; — et *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 4 juillet et 28 novembre 1892.

(**) Les Abîmes, p. 101, 106, 503, 510.



Le suintement remplit, en général, des bassins isolés ou réunis entre eux; les pertes sont continuées par les rivières souterraines. Les variations de niveau des uns et des autres dépendent exclusivement des précipitations atmosphériques extérieures. D'après les observations précises suivantes, elles doivent être beaucoup plus brusques qu'on ne semblait l'admettre jusqu'à présent.

*Ruisseaux absorbés.* — Dans les diverses grottes du cours souterrain de la Piuka (Adelsberg, Piuka-Jama, Planina, etc.), MM. Kraus et Putick ont observé fréquemment que les crues intérieures suivaient à quelques heures près celles de l'extérieur, retardées seulement de plus en plus vers l'aval par les différents siphons interposés.

Le 20 septembre 1893, j'y ai vu, dans un des petits lacs souterrains, 1 mètre d'eau de plus que le 16. Le 18 septembre 1893, j'ai vu la Piuka à Planina croître et décroître de $0^{m},60$ en quatre heures (*). Gaupillat, en 1892, a constaté que les rivières souterraines de la Baume-de-Sauvas (Ardèche) et du Tindoul de la Vayssière coulaient à gros bouillons moins de vingt-quatre heures après de fortes chutes d'eau en amont (Les Abîmes, p. 129, etc.). La Lesse, dans la caverne de Han, subit également des crues et baisses très rapides; nous nous en sommes assurés, M. L. De Launay et moi, en avril 1890.

De même, à Peak-Cavern (Derbyshire), en juillet 1895.

Mes récentes observations à Padirac sont particulièrement instructives. Le courant souterrain y est en somme formé par plusieurs ruisseaux perdus dans une faille et reparaissant à 100 mètres sous terre en une fontaine unique. Les 9-10 juillet 1889 et 9-10 septembre 1890, la fontaine coulait faiblement; les 22-23 septembre 1890, un

(*) Les Abîmes, p. 100, 191, 450.

orage la grossissait considérablement ; le 28 septembre 1895, au soir, elle était tarie ; le lendemain matin, elle recommençait à couler très peu ; du 28 mars au 1er avril 1896, pendant de fortes chutes de pluie et neige, son débit était plus fort que nous ne l'avons jamais vu ; il a dû atteindre, à son maximum, 1 mètre cube par seconde ; et nous avons, durant ces cinq jours, constaté que ses variations suivirent exactement, avec vingt-quatre heures environ de retard, celles de la précipitation atmosphérique (*).

Ces faits ne permettent plus guère d'énoncer que « dans les calcaires fissurés les variations du régime météorologique ne se font que lentement sentir sur les réservoirs intérieurs des sources (**) ». Ils nous autorisent à demander la modification de ce principe, admis jusqu'ici.

*Vitesse des rivières souterraines. Expériences de coloration.* — Disons maintenant quelles données on possède sur la vitesse de propagation des rivières souterraines. Elles résultent d'expériences de coloration : des solutions de fluorescéine ou d'uranine, jetées dans des pertes de rivières, ont coloré les sources supposées correspondantes avec une rapidité plus ou moins grande, consignée dans le tableau ci-dessous (***) :

(*) V. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 20 avril 1896 ; — et *Revue de géographie*, juin 1896.

(**) De Lapparent, Géographie physique, p. 87.

(***) V., pour plus de détails. Les Abîmes, p. 477. 553, etc. ; — et De Agostini et Marinelli, Studii idrografici sul Bacino Della Pollaccia, *Rivista geografica italiana*, mai 1894. — Rappelons aussi les expériences de M. Ferray pour l'Avre et l'Iton (Eure) ; *Comptes rendus de l'Association française pour l'avancement des sciences*. Caen, 1894.



| DATE de l'expérience | NOMS des expérimentateurs | PERTE | SOURCE | DISTANCE | DURÉE de la transmission | NOMBRE de mètres par heure |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | kilomètres | heures | |
| 9 oct. 1877 | Ten Brink (ou Durand) | Danube | Aach | 14 ou 30 (?) | 60<br>24 (?) | 233 mètres<br>1,250 » (1) |
| 12 juin 1891 | Doria | Recca à Ober-Urem | Recca à Saint-Canzian | 8 | 10 | 800 » |
| 1er sept. 1893 | Piccard | Lac Brenet | Orbe | 3 | 50 | 60 » |
| 28 déc. 1893 | Forel et Golliez | » | » | » | 22 | 136 » |
| 3 mars 1894 | Agostini et Marinelli | Canal d'Arni | Pollaccia | 3,75 | 41 | 91 » |
| 28 mars 1896 | Martel et Rupin | Perte de Bagou | Rivière souterr. de Padirac | 2 | 30 | 66 » |
| D'après M. Sidéridès | | Kat. de Verzova | Benicovi | 4 | 2 à 3 (?) | 2 à 1,3 kilom. |

Beaucoup d'autres expériences de ce genre sont demeurées infructueuses, ou ont été exécutées avec trop peu de précision pour donner des résultats utiles. Ce chapitre encore est un des plus incomplets.

*Bassins de suintement.* — Les bassins stalagmitiques uniquement alimentés par les suintements des voûtes sont sujets à des oscillations analogues, quoique sans doute moins brusques et provoquées par l'évaporation.

A Padirac, le *gour*, placé à 90 mètres sous terre, entre le deuxième et le troisième puits, était tout à fait vide (si ce n'est de pierres) en juillet 1889, septembre 1890 et septembre 1895 ; complètement plein, au contraire, en mars 1896. — Au lac supérieur du grand dôme, le niveau de l'eau, en dessous de la margelle stalagmitique, était à environ 50 centimètres le 9 septembre 1890, 25 centimètres le 23 septembre 1890, 1 mètre le 29 septembre 1895 ; l'eau s'écoulait en cascatelle par dessus en mars 1896.

A *Dargilan*, au contraire, le 4 avril 1896, tous les bas-

sins étaient à peu près vides, ou du moins plus bas de 0m,75 à 1m,50 qu'en 1888, 1889, 1890 et 1892. Jamais on ne les avait vus aussi réduits. Cela tient à ce que l'année 1895 a été très sèche et qu'aucune neige n'est tombée pendant l'hiver 1895-1896 sur le Causse Noir. Le suintement des voûtes était presque complètement arrêté le 4 avril 1896. L'évaporation est donc active dans les cavernes.

A la même époque, toutes les citernes du Causse Méjéan étaient vides, et les habitants devaient descendre chercher leur eau dans les vallées.

Tout ce qui précède établit suffisamment que l'infiltration des eaux superficielles est, en général, assez rapide à travers les fissures du calcaire et que les cavernes s'emplissent et se vident plus vite qu'on ne pourrait le croire ; pour accroître leur efficacité comme réservoirs et régulateurs des eaux souterraines, il faudrait donc ralentir l'infiltration.

**Reboisement.** — Le moyen est bien connu ; il consiste à reconstituer le sol végétal par le reboisement. Mais ce n'est pas ici qu'il faut une fois de plus insister sur les désastreux effets de la destruction des forêts, ni sur le danger du lent et progressif dessèchement de la terre. Innombrables sont les preuves de ce dessèchement : disparition ou diminution de sources, officiellement constatées depuis un siècle environ ; — petitesse des canaux souterrains actuels, comparés à ceux des anciennes rivières souterraines abandonnées (à la Piuka, par exemple) ; — délaissement complet par l'eau souterraine d'aqueducs naturels aussi immenses que celui de la grotte de Saint-Marcel d'Ardèche, par exemple ; — etc., etc. (*). Ce n'est pas aux lecteurs des *Annales des Mines* que ces vérités doivent être répétées ; c'est aux adversaires de

(*) V. Delesse, *Bulletin de la Société de géologie de France*, 2e série, t. XIX (4 novembre 1861), p. 87 (Diminution de l'eau superficielle) ; — Martel, Les Abîmes, p. 220, 553.



l'administration forestière, aux peu clairvoyants pâtres et cultivateurs qu'il faudrait inspirer le respect de l'arbre ; des lois sévères pourront seules y parvenir.

*Trop-pleins et sources temporaires.* — Les crues de rivières souterraines, dont je viens de fournir des exemples, donnent la clef du fonctionnement de ces sources temporaires qu'on ne voit jaillir qu'après les grandes pluies hors de cavernes la plupart du temps à sec ; j'ai pénétré dans un grand nombre de ces trop-pleins, presque tous anciens déversoirs de courants jadis beaucoup plus importants, aujourd'hui déchus, et plus bas enfouis dans le sol ; tous se ressemblent, depuis la caverne d'Ingleborough, en Angleterre, jusqu'à celle de la Rjeka, au Monténégro ; depuis la grotte de Saint-Gery (la Bonnette, Tarn-et-Garonne) jusqu'au Kephalovrysi (source) de Benicovi (Péloponèse). Chacun mène, après un plus ou moins long trajet, aux cours actuels de ruisseaux souterrains et aux siphons qui les entravent. Ce sont les soupapes de sûreté des inondations souterraines. Parfois nous avons pu circuler pendant des sécheresses dans de vrais siphons désamorcés (source de l'Ecluse, Ardèche ; — Rjeka du Monténégro ; — source des Douze, Lozère ; — le Boundoulaou, Aveyron ; — Grotte du Sergent, Hérault ; — de l'Aluech, Aveyron ; — Œil-de-la-Dou (Lot), exploré par M. Rupin ; — source du Liron, trop-plein du Lez (Hérault), exploré par M. Twight, etc., etc.).

Parmi les plus curieux de ces trop-pleins sont certainement ceux de la *Bonnette* et de l'*Oule* (Lot). A la source de la Bonnette, l'eau ne sort plus à l'étiage, par la caverne, mais 15 à 20 mètres au dessous, par un étroit canal impénétrable ; l'ancien déversoir ne fonctionne plus que très rarement, après les très fortes chutes de pluie ; le plan et la coupe de la Pl. I (*fig.* 3 et 4) expliquent suffisamment le fonctionnement de cette source. — Quant

à l'Oule, elle ne coule que lorsque la source du Lantouy (source de fond, comme le Loiret), à 3 kilomètres au nord et 50 mètres plus bas, jaillit à gros bouillons. En 1894 et 1895, l'Oule a été explorée à diverses reprises par MM. G. Pradines et Aymard (de Limogne) et moi-même ; à chaque visite, le niveau du siphon final a été trouvé différent. Et même, en octobre 1895, il était complètement obstrué par du sable. Des modifications dues à des déplacements ou éboulements d'argile y ont été aussi constatées. Le plan et la coupe, Pl. I, *fig.* 1 et 2, montrent suffisamment comment l'eau, pour se faire jour au dehors, a transformé les fissures du sol. Les dispositions siphonnantes les plus complexes s'y remarquent ; elles expliquent comment des amorçages subits peuvent donner lieu aux brusques, quoique rares, jaillissements, parfois élevés de plusieurs mètres, qui ont rendu cette source très célèbre dans la région de Cahors. Je ne saurais mieux terminer que par ce remarquable exemple tout ce qui se rapporte à l'hydrologie des cavernes.

---

## TROISIÈME PARTIE.

### LES CAVERNES DU PEAK (DERBYSHIRE) ET LEURS RELATIONS AVEC LES FILONS MÉTALLIFÈRES.

Relation des cavités naturelles avec les filons. — Il est aisé de comprendre qu'une relation puisse exister entre les abîmes, cavernes et sources, d'une part, et les filons métallifères, d'autre part, puisque les cassures naturelles du sol ont dirigé aussi bien le travail excavateur des eaux souterraines, que l'œuvre de précipitation ancienne des émanations métalliques. Dans les divers phénomènes d'altération et de remise en mouvement des minerais, que les



eaux superficielles produisent sur la partie haute des filons, et particulièrement quand ceux-ci recoupent des calcaires, on a souvent constaté l'intervention de véritables grottes contiguës à ces filons, et où se sont parfois redéposés, par une réaction secondaire, des minerais empruntés aux gîtes voisins. Ces grottes, incrustées ainsi de galène, de blende, de carbonate de plomb, de calamine, de gypse, etc., où l'on a parfois voulu voir la forme primitive du gîte métallifère, ont été, en réalité, creusées longtemps après le dépôt de celui-ci, alors que la surface du sol était déjà à son niveau actuel, et l'on comprend que les eaux, acidifiées par leur contact avec des sulfures métalliques divers en présence de l'oxygène de l'air, aient dû avoir sur les calcaires une action corrosive tout particulièrement intense (*).

Nous nous contenterons de rappeler ici, parmi les cas les plus connus de grottes encore ouvertes au contact de gîtes métallifères, ceux du Laurium en Grèce, d'Eureka dans le Nevada, de cavernes plombifères dans la dolomie (Haut-Mississipi ; V. Von Groddeck, Gîtes métallifères, p. 323), etc. (**). Les poches à phosphorites du Quercy, de phosphate et de manganèse du Nassau, de minerai de fer sidérolithique du Berry, etc., se rattachent également au même ordre de phénomènes.

Il y aurait un grand intérêt à préciser, par des études directes et méthodiques faites sur ces grottes et poches, les conditions exactes de ces relations, la vraie nature du rapport entre les cavernes et les filons, l'ordre de succession général des deux phénomènes, etc.

Les profondes explorations d'abîmes sont-elles de nature à faire connaître dans cet ordre d'idées des choses inté-

---

(*) V. L. De Launay, L'Argent, p. 95-106; Paris, J.-B. Baillière, 1896; in-8°.

(**) A Balls-Eye-Mine près Bonsal, le minerai de plomb argentifère remplissait une grotte naturelle jusqu'à la hauteur d'un mètre de la surface du sol (Short, *op. cit.*, 1734, p. 73).

ressantes ? Quelques faits, jusqu'à présent très rares, mais très caractéristiques, permettent de répondre affirmativement sans nulle hésitation.

Le plus curieux est assurément la galerie de mine découverte, en juillet 1892, par mon collaborateur G. Gaupillat, au fond de l'abîme de Bouche-Payrol, près Silvanès (Aveyron), à 120 mètres sous terre. Il est dans le calcaire de transition ; la galerie est taillée au pic ; les scories et la couleur verte des stalactites dénotent un gisement cuprifère ; cette exploitation reste un mystère, et l'on n'a pas encore fait l'étude que je recommandais (p. 165 des Abîmes) pour la solution de ce curieux problème.

Une des galeries de Bramabiau renferme un filon de fer dont l'injection en plein calcaire infraliasique n'est pas moins énigmatique.

Enfin, les cavernes du Peak, en Derbyshire (Angleterre), recoupent une quantité de filons plombifères.

J'ai visité ces cavernes l'année dernière, et la description détaillée que je vais en donner fournira quelques vagues indications sur les rapports des deux phénomènes, en même temps qu'elle présentera un assez complet résumé des questions géologiques et hydrologiques examinées dans les pages qui précèdent.

Cavernes du Derbyshire. Le Peak. — Le *Peak* (Derbyshire), dont ni les formes ni l'altitude (300 à 637 mètres) ne justifient le nom (le pic), est un ensemble de plateaux calcaires carbonifères, sillonnés de peu profondes vallées, entre Manchester et Sheffield.

Sur son versant oriental, aux sources de la rivière Derwent, le village de Castleton est depuis longtemps célèbre pour ses environs pittoresques et ses très curieuses cavernes, qui sont au nombre de trois : la Peak-Cavern, la Speedwell-Mine et la Blue-John-Mine.



Les deux dernières sont en partie artificielles, et toutes trois présentent des dispositions exceptionnelles, — sur lesquelles je vais m'étendre, — en ce qui touche l'hydrologie souterraine et la relation avec les filons métallifères de la région.

*Peak-Cavern.* — La caverne du Peak, nommée aussi caverne du Diable (*Devil's arse*), derrière le village même de Castleton, est peut-être la plus populaire d'Angleterre, et chaque jour de nombreux touristes s'y succèdent.

Il y a cent ans que le naturaliste français Faujas de Saint-Fond l'a traitée de magnifique caverne dans une description de 17 pages, fort ampoulée, consacrée à cette première des « sept merveilles du Derbyshire, célébrée par plusieurs poètes (*) ».

Schmidl, le vaillant explorateur des cavernes d'Autriche, la cite dans un de ses mémoires (**) et lui attribue, par ouï-dire, une longueur égale à 458 klafter de Vienne, soit 868 mètres. Badin (***) dit que sa grande salle est « tellement immense que les flambeaux n'en peuvent dissiper les ténèbres, et qu'il est impossible d'en mesurer l'élévation et la profondeur ». Enfin, les guides spéciaux et de nombreuses descriptions anglaises en font naturellement le plus pompeux éloge.

Disons tout de suite que l'entrée seule, le vestibule, est digne d'admiration, bien méritée, il est vrai, car c'est un tableau moins grandiose, mais plus gai que Vaucluse, et aussi surprenant que la perte du Réveillon, dans le Lot, et la sortie de la Piuka à Kleinhaüsel (Carniole).

C'est, d'ailleurs, une rivière souterraine qui a édifié ce porche monumental : mais elle ne l'utilise plus que comme trop-plein, lors de ses crues, car elle est bien déchue de

(*) Voyage en Angleterre, t. II, p. 361-377.
(**) Die Baradla-Hohle, 1856.
(***) Grottes et Cavernes, p. 198 ; Paris, Hachette, 1870, in-12.

son ancienne puissance et elle jaillit aujourd'hui en aval et à un niveau inférieur, en trois points où nous reviendrons tout à l'heure. Au printemps, il faut souvent la déblayer (*) après les flux de l'hiver.

Retrouver son cours intérieur et reconnaitre les causes de ses débordements à la suite des grandes pluies, telle est la seule raison de pénétrer à l'intérieur de Peak-Cavern, qui ne possède pas une seule jolie concrétion.

Sur le plan et la coupe (Pl. III, *fig.* 1 et 2) figurent les dispositions dignes de remarque.

Du côté ouest du vestibule (à droite en entrant) s'ouvre dans la voûte une fissure (aven), à peu près verticale, qui a dû amener jadis de fortes infiltrations ; elles confluaient là avec le courant qui venait du cœur de la montagne.

J'ai dit plus haut que ce courant ne sort plus ici en temps ordinaire, mais seulement lors des crues ; encore ne remplit-il, en ce cas, qu'une partie du vestibule, une sorte de fossé creusé dans l'argile de remplissage, le long et au pied de la paroi est (à gauche en entrant).

Derrière une porte placée au fond du vestibule, un couloir a été nommé *salle des Cloches*, à cause des petits dômes d'érosion creusés dans sa voûte ; au bout, le *Styx* est un bassin d'eau de 15 mètres de longueur sur 2 ou 3 de largeur ; autrefois on le traversait à demi couché dans un bateau, pour passer sous une strate rocheuse et déboucher dans la grande salle qui le suit. On a simplifié ce passage et pratiqué un tunnel dans le rocher voisin.

Le déversoir du Styx (qui n'a pas 1 mètre de profondeur) est, dans la salle des Cloches, une simple infiltration d'eau entre les pierres du sol.

Les dimensions que la majorité des auteurs prêtent à la

(*) Caves of the earth, p. 46. (Pour les renvois bibliographiques voir la liste à la fin de chapitre.)



Grande-Salle doivent être réduites de 82 à 60 mètres environ pour la longueur, de 64 à 30 pour la largeur et de 37 à 25 ou 30 pour la hauteur (*). C'est un évidement d'érosion et de corrosion, pratiqué par les eaux souterraines, en amont des strates plus résistantes du Styx et de la salle des Cloches, avant qu'elles aient réussi à s'évacuer par là. Faujas de Saint-Fond ignore « ce qu'ont pu devenir les matériaux qui ont dû occuper d'aussi grands vides ». Ils ont été dissociés par l'eau, qui s'est chargée du carbonate de chaux et a déposé l'argile. Une partie, d'ailleurs, est demeurée dans la salle sous forme de deux talus entre lesquels le menu ruisseau du Styx a tracé son lit.

Un petit sentier en zigzag gravit le talus méridional, en haut duquel s'ouvrent deux petites galeries ; l'une, droit au sud, est une impasse argileuse ; l'autre, vers le sud-est, est plus large et débouche, après deux ou trois coudes, sur un balcon rocheux, nommé la *Chaire* ou l'*Orchestre*, à l'élévation *considérable* de ... 7 mètres au-dessus du sol d'une autre petite salle nommée *Roger-Rain's House ;* les visiteurs se rendent de la Grande-Salle jusqu'au pied de l'Orchestre par le chemin ordinaire, très facile, un large couloir montant et tournant. Bien mieux que les explications du guide, le magnésium et la boussole m'ont fait voir là une curieuse disposition, suffisamment expliquée par la coupe.

Roger-Rain's House (la maison de la pluie du génie Roger) communique avec la Grande-Salle par deux passages, l'un inférieur (celui des visiteurs), l'autre du balcon, tous deux forés par l'eau. A la voûte de Roger-Rain's House, une fissure d'infiltration débite une cascatelle qui ne tarit jamais, paraît-il, et dont le volume varie selon

(*) Aikin, *op. cit.* (1795). lui donne bien 70 yards de long, mais 40 de haut. Le yard vaut 0m,914.

l'abondance des pluies. On prétendait que cette *pluie du génie Roger* provient d'une petite source (*Lady's Well*), qui, dans le ravin de *Cave-Dale*, derrière le château de Péveril (*), se perd dans des fissures rocheuses presque dès sa naissance ; cette hypothèse doit être exacte ; en superposant le tracé extérieur de Cave-Dale au tracé intérieur de la caverne, j'ai reconnu qu'il y a peu de distance horizontale (environ 150 mètres) et 20 mètres de différence de niveau entre la perte de Lady's-Well et la voûte de Roger-Rain's House (V. la coupe *fig.* 2). En temps ordinaire, cette infiltration constante, qui nous montre, comme bien d'autres *swallow holes*, que les terrains calcaires anglais ne sont point encore parvenus au desséchement superficiel complet, sert d'aliment au Styx, qu'elle va nourrir par la galerie des visiteurs et la Grande-Salle. Après les fortes pluies, elle doit se subdiviser en deux parties, et la seconde se déverse dans une autre galerie (*Pluto's Dining-Room*) qui s'incline assez rapidement vers le sud ; c'est la continuation de la caverne. Après 150 mètres de parcours et 23 mètres de descente, cette galerie tourne à angle droit et est occupée par un vrai cours d'eau, beaucoup plus abondant que le Styx, et réel excavateur de ce labyrinthe ; à main gauche (côté est), il disparaît sous une voûte basse où l'on ne peut le suivre ; mais jadis (et maintenant encore aux grandes eaux) il s'élevait jusqu'à Roger-Rain's House, redescendait dans la Grande-Salle, puis remontait un peu la salle des Cloches pour sortir, impétueuse rivière, par la grande arche d'entrée, qu'il délaisse maintenant d'ordinaire : ma coupe fait bien voir, avec les hauteurs deux fois et demie plus grandes que les longueurs, les deux curieux siphons successifs ainsi parcourus par l'ancien torrent ; elle explique aussi

(*) Sous le donjon de ce château, M. Rooke Pennington a trouvé et fouillé une petite caverne préhistorique (celtique?) (*Quarterly Journal of the geological Society*, t. XXXI, 1875, p. 238).



comment, au confluent de Roger-Rain's, il devait se produire un excès de pression qui a favorisé l'excavation de la galerie du balcon et de la Grande-Salle. Tout cela s'est vidé le jour où, conformément à l'universelle loi des cavernes, l'eau a pu se frayer, à un niveau inférieur, une nouvelle voie qui lui évitait l'ascension des siphons. Cette voie, impénétrable à l'homme actuellement, est marquée sur les deux figures par une ligne pointillée (courant inconnu).

La suite de la galerie est désormais en pente fort douce, ne s'élevant guère que de 4 ou 5 mètres sur les 300 mètres pendant lesquels on peut la remonter ; le ruisseau y coule bruyamment entre des berges d'argile, sur lesquelles on a tracé un bon sentier qui franchit l'eau cinq fois. La hauteur du couloir, peu accidenté, sans aucun effondrement, est de 3 mètres en moyenne ; sa largeur est de 4 à 6 mètres.

A la voûte, on remarque les régulières petites ogives de plusieurs arcades (*arches*) ; ce sont des diaclases transversales, agrandies en fuseaux, comme dans la plupart des cavernes ; quelques-unes ont pris la forme de petites coupoles d'érosion ; et trois d'entre elles, les principales, sont de grandes fissures d'infiltration, comme celle du vestibule, — des affluents souterrains pareils à Roger-Rain's, mais ne fonctionnant plus maintenant, sans doute, qu'après les pluies ou la fonte des neiges. — La dernière de ces crevasses verticales est un énorme *aven*, une de ces fissures ascendantes que les mineurs de la contrée nomment des *rakes*, large de 6 à 10 mètres et incliné de 75 à 80° environ sur l'horizon ; c'est un abîme inachevé, c'est-à-dire une cassure que l'érosion n'a pas dilatée jusqu'à la surface du sol, car l'on n'y a pas trouvé son orifice. Il est fort élevé cependant, tout en n'ayant pas sans doute la hauteur de plus de 300 pieds qu'on lui attribue ; s'il l'atteignait, il recouperait la surface du sol, qui,

d'après la superposition de la carte au 10.560ᵉ et de mon levé souterrain, doit se trouver en cet endroit à 100 mètres au-dessus du niveau de la rivière intérieure. Ce gouffre, fermé par le haut, nommé *Victoria-Cave*, et découvert en 1842, rentre dans la catégorie des avens latéralement greffés sur des rivières souterraines, tels que Rabanel, les Combettes, le Mas-Raynal (*) et le Grand-Dôme-de-Padirac (**). Comme pour tous les puits verticaux des voûtes de caverne, il serait bon d'en effectuer l'ascension, afin de rechercher s'il ne sert pas d'exutoire à un ou plusieurs étages de grottes. Autrefois, on avait construit une sorte d'échafaudage pour éclairer le gouffre par le haut. Mais les bois se sont pourris ; on pourrait les rétablir et les prolonger en hauteur.

On sait que nous avons trouvé, sous les Causses, maints exemples de ces superpositions (Viazac, Baumes-Chaudes, Tabourel, etc.), et que MM. Marinitsch, Müller et Hanke ont rencontré plusieurs excavations latérales importantes, en escaladant ainsi les parois presque verticales du colossal souterrain de la Recca, près Trieste (***).

Au pied même de Victoria-Cave, il y a un autre affluent, horizontal, celui-là ; un filet d'eau sort d'une très courte galerie (V. le plan, Pl. III, *fig.* 1), où la marche est arrêtée au bout de quelques mètres par un bassin d'eau ; la voûte baisse, mais un tournant ne m'a pas permis de voir s'il y a là un siphon véritable, la profondeur était trop grande pour s'y avancer, et je ne sais guère si un bateau, même démontable, pourrait évoluer ici ; c'est un point qu'il y aurait lieu d'examiner après une longue sécheresse ; les eaux étaient assez hautes lors de ma visite ; la température de cet affluent était de 8° C.,

(*) V. Les Abîmes, p. 143, 172, 325.

(**) V. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 24 octobre 1895 ; — et *la Nature*, 16 novembre 1895.

(***) V. Les Abîmes, p. 209, 232, 334, 469.



ce qui correspond à la moyenne température annuelle de la localité. Il est fort possible, et j'expliquerai tout à l'heure comment, que cet affluent provienne de la deuxième grotte de Castleton, celle de la *Speedwell-Mine*.

Après ce double et curieux confluent, la galerie du ruisseau principal tourne brusquement à angle droit vers le sud-est ; au bout de 30 mètres, le sentier s'arrête, parce que l'eau occupe toute la largeur de la galerie ; en me mouillant jusqu'au ventre, j'ai pu constater qu'il fallait supprimer, comme légendaire, la soi-disant prolongation *libre* vers Perryfoot, que l'on affirmait exister jusqu'à 5 kilomètres vers l'ouest ; j'ai trouvé, en effet, le siphon complet, absolu, avec la roche partout *mouillée*, après 20 mètres de marche dans l'eau (8° C.) (*). Tout ce que la vérité permet de dire, c'est que l'eau, étant fort claire, doit venir de loin en se filtrant, en route, à travers des éboulis ou d'étroites fissures ; et que la relation avec Perryfoot, où un ruisseau se perd dans un swallow-hole, est vraisemblable, mais ne peut être constatée matériellement, si ce n'est par une expérience de coloration.

La longueur de 2.250 à 2.300 pieds (686 à 701 mètres) que l'on attribue à Peak-Cavern doit être exacte ; j'ai trouvé, par une simple mesure approximative au pas, 650 mètres environ.

En résumé, l'intérieur de la caverne du Diable, sans aucun attrait pittoresque, est du plus haut intérêt hydrologique ; sa partie sèche apprend comment ont travaillé les eaux souterraines d'autrefois ; sa galerie du ruisseau montre comment elles fonctionnent aujourd'hui. Toutes deux confirment ces conclusions formelles de mes précédentes recherches, savoir :

(*) Bray raconte, d'ailleurs (Sketch of a tour, p. 198), que, vers 1773, quelqu'un, ayant essayé de plonger sous les roches, ne réussit qu'à s'endommager la tête et à s'évanouir au fond de l'eau, d'où on le retira avec peine.

1° Que les eaux actuelles sont beaucoup moins abondantes que les anciennes;

2° Que, dans les cavernes, elles n'ont jamais cessé de chercher et de trouver des niveaux de plus en plus profonds;

3° Et que les rivières souterraines aboutissant à des sources sont bien, dans les terrains fissurés, les collecteurs généraux de crevasses de drainage, ramifiées à l'infini dans le sol, sous forme de galeries ou de puits verticaux.

Comme dans le Périgord (V. Les Abîmes, p. 376), les gens du pays affirment que la caverne a été formée par une action volcanique et « agrandie par la force des courants souterrains (*) ».

**Sources de Peak-Cavern.** — Nous avons à examiner maintenant les sources qui, entre la caverne et le village de Castleton, sourdent de terre, pour former le ruisseau nommé *Peak's-Hole-Water*, rejoignant à *Hope* la rivière *Noe*, affluent elle-même de la *Derwent*.

Il y a trois de ces sources, toutes impénétrables à l'homme. La première, à 50 mètres de distance et à 15 mètres en contre-bas de l'entrée de Peak-Cavern, sort d'un joint de strates encombré de gravier (A du plan); son volume, son altitude, sa limpidité et sa température (+ 8° C.) suffisent à prouver qu'elle est la réapparition du ruisseau souterrain qui se perd dans le milieu de la caverne, au pied de la grande descente, à 400 mètres de distance environ et seulement 2 ou 3 mètres plus haut. Je n'ai aucun doute sur cette communication évidente. La pente de la partie inconnue du courant souterrain (qui s'écoule sans doute, non pas dans une galerie de large section, mais simplement entre des *joints* de strates) est légèrement plus faible que celle de la partie

(*) Heywood's penny guide to Castleton, p. 8; Manchester, 1895.



visible (sur près de 300 mètres), entre les deux siphons de Peak-Cavern. La disposition est la même que dans quantité de cavernes servant ou ayant servi de réservoirs à une source voisine, par exemple la grotte d'Osselle (Doubs), près Besançon, et l'abîme du Mas-Raynal (Aveyron), où j'ai retrouvé la Sorgues, etc.

La deuxième source est 80 mètres plus loin sur la rive gauche du ruisseau formé par la première ; sous le chemin qui mène à la grotte, elle sort de la terre même (B du plan) parmi les herbes, beaucoup plus abondante, bien moins claire et sensiblement moins fraiche, à la température de 9°,3; il résulte de ces trois particularités qu'elle ne vient pas de Peak-Cavern. Son origine est inconnue.

Ainsi grossie, la Peak's-Hole-Water s'augmente encore sur sa rive droite, cette fois, de la troisième source (C du plan), la plus abondante; elle jaillit avec violence, comme source de fond, pareille à Font-Polémie du Lot, d'un bassin où on l'a captée. De même que la deuxième, elle est à 9°,3 et pas très limpide. Les orages des jours précédents l'ont certainement troublée. On la nomme *Russet-Well* (puits Russet), et on affirme que, débitant en moyenne 4.000 gallons par minute (18.173 litres), elle n'a jamais cessé de couler et d'alimenter Castleton depuis des siècles.

Or, dans la mine de Coalpitmine-Hole, à 1 kilomètre ouest de Perryfoot, une rivière souterraine trouvée, à 40 fathoms (73 mètres) de profondeur, a servi à épuiser toutes les eaux de la mine. Cette rivière contenait du gravier, et il y a quelques années on a remarqué que les travaux de la mine troublaient le Russet-Well, distant de 6 kilomètres à l'est. De même, on a vu souvent les crues chasser hors de Peak-Cavern des grit-stones (grès), que l'on ne recontre qu'autour d'Eldon-Hole (à 4 kilomètres ouest). « La circulation des eaux souterraines a, d'ailleurs, subi beaucoup de changements depuis cent cinquante ans,

du fait des exploitations minières » (Geology of North Derbyshire, p. 100 et 131).

Il semble donc bien établi que l'eau de Peak-Cavern vient de Perryfoot, et celle de Russet-Well, de Coal-Pitmine.

Mais leurs différences, assez inexplicables, de température et de limpidité, prouvent, d'autre part, que, tout en restant fort voisines dans leurs parcours souterrains, elles ne se mêlent cependant pas.

Il est bien probable que la convergence, à Castleton, de ces trois afflux d'eau a considérablement influé sur le creusement de la ravine étroite, au fond de laquelle s'ouvre la grotte ; on remarque, en face de la deuxième source, sur la rive droite du ruisseau, une immense crevasse qui a détaché une partie de la falaise du château de Péveril ; comme aux sorties de Bramabiau (Gard), de Vaucluse, de la Piuka à Planina (Carniole), le vestibule de la caverne devait s'étendre sans doute beaucoup plus en aval jadis : les éboulements successifs, provoqués par l'action des eaux, l'ont fait reculer à sa place actuelle, et la ravine de Castleton marque bien probablement l'emplacement d'une voûte de la grotte effondrée.

Géologiquement, cette gorge est tout à fait remarquable.

*Speedwell-Mine.* — La seconde grande caverne de Castleton est la *Speedwell-Mine*, dont l'entrée se trouve à 950 mètres à l'ouest de Peak-Cavern et 75 mètres plus haut (altitude, 265 mètres, au lieu de 190). Voici comment on la décrit aux visiteurs.

Pendant onze ans, et au prix de 14.000 livres sterling (350.000 francs), une galerie de mine avait été, il y a environ un siècle (*), creusée pour la recherche du

(*) En 1777, on avait creusé 500 yards (Bray, *op. cit.*, p. 218), et, en 1789, le travail était presque achevé (Pilkington, View of the present state of Derbyshire, 1789, p. 126).



minerai de plomb ; elle est en droite ligne vers le Sud, et rencontra seulement des filons si peu importants et si peu nombreux que les travaux furent abandonnés ; mais ils avaient reconpé au bout de 750 yards (685 mètres) un effroyable abîme, dont la voûte et le fond sont *complètement invisibles*, ce qui ne l'empêche pas, à 27 mètres de profondeur, de se terminer par un bassin d'eau « stygienne » ; ce bassin est nommé le « puits sans fond », parce qu'il a englouti 40.000 tonnes de déblais, extraits du prolongement à 600 yards plus loin de l'infructueuse galerie de recherches (*). On prétend que le bassin est à près de 280 yards (256 mètres) au-dessous de la surface du sol, et que des fusées de force suffisante pour s'élever à 450 pieds (137 mètres) ont été lancées sans pouvoir atteindre la voûte (soit à 164 mètres au-dessus du bassin).

Les eaux d'infiltration ont transformé la galerie de recherches en un canal navigable (*the level*, le niveau), profond de 1 mètre environ et large de $2^{m},10$, par où l'on conduit les touristes en bateau jusqu'à la crevasse.

Celle-ci débite, après les pluies, beaucoup d'eau, qui est absorbée, comme le trop-plein du canal, par le puits sans fond ; en travers de ce dernier, sur une solide plate-forme, on fait débarquer les visiteurs, pour leur montrer, à l'aide de bougies allumées assez haut, les grandes dimensions de la caverne. Une vanne mobile leur procure même le spectacle d'une bruyante cascade souterraine qu'on précipite à volonté dans le *puits sans fond*.

En fait, on pénètre ici sous terre par une entrée artificielle et, après une descente de 20 mètres le long d'un escalier d'une centaine de marches, on s'embarque sur le canal ; la très lente navigation est assez désagréable

(*) Geology of North-Derbyshire, p. 129 ; — Mawe, *op. cit.*, p. 49 ; — Farey, *op. cit.*, p. 267.

dans l'étroit boyau où l'on doit souvent baisser la tête ; car il n'a pas partout la hauteur de 3 mètres qu'on lui attribue ; le nautonnier fait avancer l'esquif avec ses mains en les appuyant contre la muraille, et de fumeuses chandelles empestent l'atmosphère confinée.

L'altitude est d'environ 245 mètres (*), et la « Grande-Salle », ou *Devil's Hall*, comme on l'appelle, est tout simplement, de même que Victoria-Cave, un immense aven (nommé le *New-Rake*) caché dans les entrailles de la terre et qui ne se manifeste point au dehors ; véritablement grandiose avec ses 10 mètres environ de diamètre, ses parois rongées par l'eau, et sa haute envolée dans le vide noir, cette cheminée est un colossal drain naturel (**), légèrement incliné de l'ouest à l'est, dont les eaux remplissent le *level* en temps de pluies; le bassin du fond ne m'a pas paru aussi bas que les 27 mètres prétendus, je n'y suis point descendu, car il est fermé de toutes parts; c'est un siphon bien large et bien profond sans doute, puisqu'il n'a pas pu être engorgé par les déblais qu'on y a jetés, et que le poids de l'eau assurément aura entraînés plus loin, vers Peak-Cavern, dit-on. Je le croirais volontiers, car la température de l'eau du *level* et du ruisselet qui tombe de l'aven est de 8° C., exactement comme à Victoria-Cave ; de plus, même en tenant pour exacte la profondeur du puits sans fond, l'altitude de son bassin est de 218 mètres, c'est-à-dire supérieure de 20 mètres au moins à celle du siphon non vérifié de Victoria-Cave. (V. *suprà*), distant de 700 à 800 mètres seulement. Cela

(*) L'altitude de 700 pieds (213m,5), donnée dans Geology of North-Derbyshire, p. 229, n'est conforme ni aux courbes de la carte au 10.560e, ni à mes observations barométriques.

(**) Ces cheminées se nomment en anglais *Rakes*, quand elles ont de grandes dimensions ; *Scrins*, quand elles sont petites (Geology of North-Derbyshire, p. 121).



donne une pente de 2 1/2 p. 100, qui est amplement suffisante. Je crois à cette communication (*).

Mais il est inexact de dire que le terrain au-dessus du bassin a 256 mètres d'épaisseur ; tout au plus y en a-t-il 180, car, d'après les courbes de la carte au 10.560e, l'altitude de la surface ne saurait dépasser beaucoup 400 mètres (**). Quant à la hauteur totale de la fissure, il est impossible de l'apprécier : la voûte est *positivement invisible;* l'expérience des fusées est puérile et ne peut rien prouver ; elles ont dû s'arrêter en route contre quelque saillie de roches, parce que la forme intérieure est très irrégulière et ne permettrait même pas une mesure à la montgolfière. Néanmoins, je ne saurais arguer de faux l'élévation supposée de 164 mètres, puisque telle est la profondeur *verticale absolue* où je suis descendu moi-même dans une fissure analogue, mais ouverte au jour, l'étonnant abîme de Jean-Nouveau, en Vaucluse, que j'ai déjà cité tant de fois. Mais, si cette hauteur est exacte pour la Grande-Caverne de la Speedwell-Mine, il s'en faut de bien peu alors que la surface même du plateau ne soit atteinte par elle. La coupe *fig.* 2, Pl. II, fera comprendre tout ce que je viens de dire.

Elle explique les positions relatives et la théorie des communications supposées entre les trois cavernes de Castleton, dont la dernière nous reste à décrire.

*Blue-John-Mine.* — Cette troisième caverne est la *Blue-John-Mine*, à 900 mètres au nord-ouest de la Speedwell-Mine, d'où l'on peut s'y rendre soit en voiture, par la grande route, soit à pied, par le très pittoresque défilé

(*) Elle serait invraisemblable, si le level était réellement à 213m,50, car le puits sans fond, à 186 mètres, se trouverait alors plus bas placé que Peak-Cavern.

(**) 1.300 à 1.400 pieds (396m,5 à 427), d'après The Geology of North-Derbyshire, p. 129.

rocheux des *Winnats*, une curiosité des environs de Castleton.

La Blue-John-Mine est le gisement célèbre d'une substance dont les dépôts exploitables par grandes masses sont fort rares (*), la *fluorine*. Le tournage de cette pierre fragile, aux jolies transparences bleues, violettes ou rosées, est la principale industrie de Castleton, Buxton, et de leurs environs (**). On en fait des vases et bibelots d'ornement. On prétend même que les précieux vases *murrhins* dont parle Pline étaient en fluorine. D'ailleurs, les Romains ont connu et exploité les gisements plombifères de la région. L'*Odin-Mine*, toute voisine, a été creusée avant l'introduction du christianisme, pour l'extraction du plomb argentifère, qu'on y exploite encore de nos jours (***).

D'après la brochure descriptive de W. Royse, qui se vend à l'entrée de la Blue-John-Mine, il paraîtrait que les cavités naturelles s'y ramifient et s'y étendent fort loin (sur 5 kilomètres de développement??), et qu'un certain lord Musgrave (ou Mulgrave) aurait jadis passé trois jours entiers, avec plusieurs ouvriers, à en explorer les diverses parties sans voir la fin.

Bien que je n'aie pas pu, faute de temps, visiter ces souterrains en détail, comme je l'eusse désiré, je les ai suffisamment examinés pour me rendre compte que cette brochure est (comme toutes les descriptions que j'ai lues de la Blue-John Mine) pleine de confusions, d'inexactitudes et d'exagérations, pour me convaincre aussi qu'il reste à exécuter là une des plus curieuses investigations de cavernes de toute l'Angleterre : non seulement le plan

(*) Taylor (cité par le guide Murray, Derbyshire. p. 56; Londres, 1892) prétend même que Blue-John-Mine en serait la seule exploitation, mais Farey (*op. cit.*, p. 460) nomme une dizaine de mines où l'on trouve de la fluorine.

(**) Jannetaz, Diamants et pierres précieuses, p. 337; Paris. Rothschild, 1881.

(***) Farey, General view of Derbyshire, p. 271.



n'en a pas été levé, non seulement bien des parties y sont toujours inconnues, mais encore la Blue-John-Mine réserve aux géologues un admirable champ d'observations, pour l'étude exacte des rapports entre les filons métallifères, les fissures du sol et les eaux souterraines.

L'entrée est entièrement artificielle : galerie horizontale pendant 5 à 6 mètres (A, *fig.* 3 et 4, Pl. III), elle se continue par un escalier qui débouche au bout de quelques marches dans une fissure verticale naturelle C, autour de laquelle les degrés descendent d'environ 25 mètres (*).

Puis, une galerie en pente très douce (*the ladies' walk*), la promenade des dames, mais de petites dimensions, conduit au premier grand aven intérieur, la *caverne cristallisée* (E), tout étincelante de cristaux de spath-fluor.

Son sol se trouve à 355 mètres d'altitude, c'est-à-dire à 30 mètres seulement en dessous de l'entrée. Sa voûte ne peut donc pas avoir 250 pieds (76 mètres) de hauteur, comme le dit le guide Baddeley (Peak-District, p. 95) ; une autre estimation à 30 mètres est plus près de la vérité. Un nouvel escalier, au-dessus duquel le plafond s'abaisse fortement, mène à un second aven (F) non moins orné, nommé la *caverne des stalactites* (altitude, 345 mètres). De tous côtés s'ouvrent de nombreuses ramifications, où j'ai eu le déplaisir de ne pouvoir errer à ma guise. La descente continue, très commodément arrangée, jusqu'à un troisième relèvement des voûtes (la salle à manger de lord Musgrave G), au bout duquel une fissure à main gauche laisse échapper un ruisselet (H), la première eau que l'on rencontre, tout ce qui précède étant sec (au moins en été) ; cette eau, à 7°,2 C., est encore plus froide que celle de Peak-Cavern, ayant sans doute son origine à une plus grande altitude. Quelques mètres plus

(*) Et non de 55, comme le dit Mawe (p. 74).

loin, il faut s'arrêter sous un quatrième dôme, contre une barrière de bois qui empêche de tomber dans un *gouffre ;* d'après les explications du guide on est ici à 90 mètres sous terre et à 450 mètres de l'orifice et, au-delà du *précipice*, la grotte se prolonge pendant 1.200 mètres !

En réalité, le baromètre ne donne à la barrière que 60 mètres de descente (altitude, 325 mètres), et j'ai estimé la distance à 300 mètres tout au plus. Là s'arrêtent tous les visiteurs, auxquels l'accès du surplus de la grotte est interdit par un propriétaire assez jaloux de sa double exploitation de fluorine et de touristes ; non sans peine, j'obtiens du gardien qu'il me laisse passer sous la balustrade de la barrière, et je descends le plus aisément du monde dans le prétendu gouffre ; comme le montre ma coupe, il n'y a pas d'à-pic : simplement un éboulis de pierres et de gros blocs (J), entre lesquels murmure le frais ruisselet.

En m'aidant un peu des mains, je m'abaisse de 30 mètres, le long de cet escalier naturel, jusqu'à l'altitude de 295 mètres, et là, sous un cinquième dôme (K), moins élevé que les précédents, je vois le courant d'eau s'engouffrer tout entier dans un trou cylindrique (L), qui m'a paru *creusé à même la roche en place* et large de 60 à 80 centimètres (à 60 ou 80 mètres de la barrière tout au plus, et non à 180 mètres, comme l'a dit l'opuscule de Royse). S'y engager est chose impraticable : l'eau occupe presque toute la section ; a-t-on jamais essayé d'y descendre après une sécheresse ? Il m'a été impossible de le savoir. Au lieu des siphons des Causses et du Karst, on se voit ici en face d'un véritable puits d'absorption comme ceux des Katavothres du Péloponèse (Taka, le Dragon, Verzova, etc. ; V. Les Abîmes, chap. XVIII). Peut-être l'ouverture annulaire n'est-elle que le sommet d'un aven inférieur conduisant à un autre étage de cavités. Cela serait bien curieux à vérifier. Où va cette eau ? On l'ignore.



Bien que plus basse de 50 mètres, la Grande Caverne de la Speedwell-Mine n'est pas du tout dans sa direction, et le suintement qu'elle débite n'a pas la même température, ni un aussi fort volume que le courant de Blue-John-Mine (*).

Car il faut dire que, avant de disparaître dans son puisard, le ruisselet que je viens de suivre s'est réuni à un deuxième, beaucoup plus abondant, venant d'une autre galerie qui s'élève à main gauche vers l'Ouest ; pendant 100 mètres environ je remonte cette galerie (M), assez abrupte, en escaladant les blocs qui l'encombrent, jusqu'à l'altitude de 325 mètres, qui est celle de la barrière dans l'autre galerie ; c'est sans doute l'une des nombreuses ramifications parcourues par lord Musgrave et ses gens ; je m'y arrête, au pied d'un escarpement (N) impossible à franchir sans aide ; mais la voûte s'élève toujours, et il est probable que par là on peut accomplir le circuit dont parle fort peu intelligiblement la brochure descriptive, et qui permet de rejoindre un des grands avens de la galerie principale.

Je n'ai pas songé à entreprendre ce parcours tout seul, et j'ai dû, à mon vif regret, renoncer à une investigation plus complète.

J'en ai vu assez cependant à Blue-John-Mine pour m'expliquer son fonctionnement hydrologique et dresser le croquis ci-joint ; ce plan et cette coupe, hâtivement relevés, sont absolument incomplets et approximatifs, schématiques en quelque sorte, mais ils suffisent à donner idée de cette très étrange excavation ; les mesures barométriques seules y présentent quelque exactitude. En réalité, la Blue-John-Mine est un labyrinthe de cavernes,

(*) Il paraît que l'Odin-Mine, située plus bas et à une petite distance (450 mètres), laisse échapper un ruisseau souterrain. Je serais porté à croire que c'est celui de la Blue-John-Mine.

une superposition et juxtaposition de grandes crevasses verticales et de galeries inclinées ; l'eau du plateau tourbeux drainé par ce réseau parait converger et s'engloutir en un point unique, au plus profond du souterrain, à 90 mètres plus bas que l'entrée. Y a-t-il d'autres absorptions analogues dans le surplus de la mine? — L'affirmative semble résulter des découvertes de nouveaux dômes, galeries, lacs et ruisseaux effectuées par les mineurs en 1877, 1880, 1886 et 1891, mais qui n'ont jamais été scientifiquement contrôlées, et dont la visite est rigoureusement défendue.

Quelle est leur extension véritable ? C'est ce qu'apprendrait l'étude complète de ces très remarquables cavités.

A 50 mètres au nord-est de l'entrée, un effondrement superficiel du terrain dénote quelque affaissement de voûte intérieure ; il est justement situé entre les deux branches que j'ai pu inspecter.

C'est en cherchant la galène, comme à Speedwell, que les Romains, dit-on, sur les croupes des *Tray-Cliffs*, à l'altitude d'environ 385 mètres, au pied de l'escarpement du Mam-Tor, ont rencontré cet extraordinaire labyrinthe de fissures naturelles, tout ce réseau d'*avens* intérieurs, réunis à leur base par des couloirs plus ou moins inclinés et reproduisant la disposition si curieuse des Baumes-Chaudes, dans la Lozère ; plusieurs de ces grandes fissures sont intérieurement revêtues de haut en bas de stalactites de ce spath-fluor, qui a rempli, en outre, quantité de petites crevasses du calcaire, d'où on l'extrait encore fructueusement de nos jours ; l'aspect miroitant de ces cristaux est, grâce à leurs couleurs variées, aussi séduisant que les plus riches concrétions de calcite et, de ce chef, la Blue-John-Mine est véritablement la grande attraction de Castleton. Là, au moins, on peut contempler un spectacle original et nouveau, plus joli certes que l'intérieur de Peak-Cavern. L'extraction se fait surtout en hiver. La valeur actuelle de ce fluorure varie de 300 à



20.000 francs la tonne, selon la taille et la qualité (en moyenne 1.000 francs).

Il serait particulièrement intéressant de rechercher à Blue-John-Mine l'origine précise et le mode de dépôt des revêtements de fluorine stalactiforme des grands dômes. Cela n'a pas encore été fait avec détail, et je ne puis formuler à ce sujet que quelques indications.

Pour l'origine du fluorure de calcium, d'abord, on s'est demandé s'il fallait la chercher dans des émanations géothermiques profondes, ou bien dans des phénomènes de dépôts et de concrétions dus à l'infiltration d'eaux superficielles chargées de fluor, ou encore dans des exsudations de la roche encaissante (hypothèse de la sécrétion latérale, de Farey et de Will. Wallace)?

Les meilleurs auteurs sont partisans de l'origine profonde et métallifère : « Des filons formés, à peu près entièrement, par une ou plusieurs de ces gangues, quartz, barytine ou fluorine, doivent être assimilés aux filons métallifères proprement dits, quant à leur mode de formation » (Daubrée, Géologie expérimentale, p. 25).

« Le gisement habituel de la fluorine est la gangue de certains filons métallifères ; souvent les filons d'étain, mais surtout les filons de quartz plombifère, parfois accompagnés de barytine, qui ont été si nombreux dans l'Europe centrale pendant le trias et l'infralias » (Fuchs et De Launay, Gites minéraux, t. I, p. 308 et 614-617 ; Paris, Baudry, 1893).

« La série des émissions anciennes du Beaujolais est close par de grands filons de quartz avec fluorine et barytine, qui remplissent des failles importantes et sont d'âge triasique et liasique » (De Lapparent, Traité de Géologie, 3e édit., p. 1437).

De plus, il est presque universellement admis aujourd'hui qu'il y a une liaison intime entre les phénomènes filoniens et la sortie des roches éruptives.

Or, non seulement le dépôt de fluorine de Blue-John-Mine, bien que non plombifère lui-même, est très voisin de veines de plomb exploitées avec plus ou moins d'insuccès à Odin-Mine, Speedwell-Mine, etc., ci-dessus mentionnées, mais encore toute la formation carbonifère du Peak est bouleversée en profondeur par trois injections d'une roche éruptive spéciale et imperméable, de nature trappéenne ou porphyritique, le *toadstone*, sur laquelle on a longuement disserté (*). Il semble donc difficile de ne pas croire à la provenance toute souterraine du spath-fluor dans cette région.

Les adversaires de cette idée l'ont combattue en disant qu'elle ne permet pas d'expliquer comment le carbonate de chaux de la Kraus-Grotte, en Styrie, s'est substitué à du gypse, en lui empruntant sa forme de cristallisation ; comment, dans une mine de Laurium, se sont formées de vraies stalactites de calamine (carbonate de zinc) ; comment surtout le fluorure ne se rencontre plus à Blue-John-Mine au-dessous de 90 mètres de profondeur. Mais les accidents de la Kraus-Grotte et du Laurium sont des pseudomorphoses dues à l'acide carbonique des eaux d'infiltration ; quant à la disparition en profondeur, elle se retrouve dans beaucoup de filons, indubitablement injectés de bas en haut : et « ce résultat ne doit pas étonner... parce que les précipitations ont été vraisemblablement déterminées soit par la diminution de la température et de la pression, soit par le conflit avec les infiltrations descendantes. Elles constituent donc un phénomène relativement superficiel » (De Lapparent, Traité de Géologie, 3e éd., p. 1505).

(*) V. les ouvrages cités dans la liste bibliographique ci-après : Geol. of North-Derbyshire, p. 123 ; — Lecornu, *op. cit.*, p. 19 et 37 ; — Von Groddeck, *op. cit.*, p. 332 ; — Von Cotta, *op. cit.*, p. 223 ; — Dufrénoy et de Beaumont, *op. cit.*, t. II, p. 515 et s. ; — Farey, *op. cit.*, p. 238 et s., p. 277 et s., — Mawe. *op. cit.*, p. 38 et s.



Ce qui me paraît indiscutable à Blue-John-Mine, c'est le remaniement, la *remise en mouvement* du fluorure par les eaux d'infiltration *après* sa précipitation ; les trois preuves suivantes en font foi :

1° L'absorption et la circulation *actuelles* des eaux infiltrées qui forment dans la caverne de vrais ruisseaux souterrains. On sait, d'ailleurs, combien les eaux souterraines aiment à côtoyer les filons, qui ont utilisé eux-mêmes les fractures du sol, et dont les gangues sont souvent délitables ;

2° La forme en *éteignoir* des *dômes*, ou *pipes* (expansion irrégulière des *rakes*), plus larges en bas qu'en haut, exactement comme les *abîmes* creusés, aux dépens des diaclases, par des courants superficiels engloutis ; l'action des eaux descendantes est, de ce chef, indéniable ;

3° Les aspects divers de la fluorine elle-même : d'une part, en effet, on la voit par places pendre aux voûtes en véritables stalactites, que la chute et l'évaporation de suintements d'eau fluatée ont seules pu produire ; d'autre part, le fluorure de calcium se présente de différentes manières à Blue-John-Mine, tantôt en couches horizontales, entre deux lits, l'un d'argile, l'autre de barytine ; tantôt en géodes ; tantôt entourant un noyau calcaire ; tantôt irrégulièrement distribué dans des fissures verticales ; tantôt en blocs isolés dans l'argile (comme celui dont on a fait le vase de Chatsworth (*), la plus grande pièce manufacturée de Blue-John). Mawe en énumère vingt-huit sortes dissemblables, et dit (p. 70) que « tous les morceaux semblent avoir adhéré à quelque chose dont ils ont été séparés ensuite ».

Il est bien certain que les morceaux ainsi empâtés dans

(*) Château du duc de Devonshire, à 20 kilomètres sud-est de Castleton. Sur les traces d'exploitation romaine, V. Geology of North-Derbyshire, p. 118. Sur le Blue-John, V. *id.*, p. 161 ; — Ferber, Oryctographie, p. 59 ; — Mawe, *op. cit.*, p. 38 et 69-82.

l'argile ne sont plus *in situ* : ils auront été arrachés de leur place primitive et mêlés avec l'argile. Les eaux seules ont pu opérer ce transport.

Je crois donc que la Blue-John-Mine a primitivement reçu, dans ses cassures préexistantes, le dépôt de la fluorine émanée des profondeurs du globe, conjointement avec le toadstone et les filons de plomb du voisinage, et qu'ensuite des infiltrations (*), plus abondantes sans doute que celles de nos jours, auront de haut en bas remanié et bouleversé ce dépôt, tandis qu'elles agrandissaient en cavernes et abîmes les fissures où il s'était effectué (**).

Mais il paraît impossible de savoir au juste si ces eaux de remaniement ont emporté du minerai de plomb en ne laissant subsister que sa gangue (au moins pour partie), ou si, au contraire, les fentes de Blue-John-Mine n'ont jamais reçu d'autres émanations que celles de la fluorine et de la barytine (***).

On voit, en somme, que l'exploration complète et raisonnée de Blue-John-Mine serait d'un haut intérêt pour les géologues et les minéralogistes, en raison des complexes relations qui s'y sont manifestées entre les fissures

(*) Au contraire, les auteurs de la Geology of North-Derbyshire supposent que les *pipes* ont été formées originairement par l'action de l'eau ; que, celle-ci ayant trouvé une autre issue, la pipe s'est remplie, au moins partiellement, de minéral ; mais que, dans bien des cas, l'eau revenant dans son ancien canal, le contenu minéral fut sapé à sa base et dut s'ébouler en masse confuse (*op. cit.*, p. 122). — Il me paraît inutile d'imaginer ainsi trois phases dans le rôle de l'eau ; la première et la seconde n'ont pas dû se produire. Boyd-Dawkins (Cave-Hunting, p. 57) dit aussi que les filons ont rempli des cavités formées par l'eau courante.

(**) Farey (*op. cit.*, p. 264, 258, 261) cite d'autres mines plombifères du Derbyshire où l'on a rencontré des cavernes naturelles : Orchard-Pipe, à Winster ; Placket-Pipe, *ibid.* ; Golcunda-Pipe, près Hopton ; Knowle's on Mason-Hill, à Matlock ; Merlin's Mine, à Eyam ; Bagshaw-Cavern, à Bradwell ; etc.. etc.

(***) Mawe (*op. cit.*, p. 72) dit cependant que, dans la terre de la caverne, se rencontrent des nodules de minerais de plomb, appelés minerais *pomme de terre*.



naturelles du sol, les filons métallifères et les eaux souterraines d'infiltration.

Telles sont les observations que j'ai faites dans les trois principales cavernes de Castleton ; elles n'ont pas été suffisamment approfondies, et il y reste encore bien des recherches à exécuter. Il doit en être de même dans toutes les autres grottes et pertes des environs, qui attendent, de la part des spéléologues anglais, des investigations perfectionnées, comme celles exécutées, depuis dix ans, en Autriche et en France.

---

## LISTE CHRONOLOGIQUE

### DES PRINCIPAUX OUVRAGES ET MÉMOIRES

CONTENANT DES INFORMATIONS

SUR

### LES CAVERNES, MINES ET EAUX SOUTERRAINES DU DERBYSHIRE

---

1734. — Dr Short, The natural... history of mineral Waters of Derbyshire ; in-4°, Londres.

1772. — J.-L. Lloyd and King, An account of Elden Hole, *Philosophical transactions of the Royal Society*, t. LXI, p. 250.

1776. — J.-J. Ferber, Versuch einer oryctographie von Derbyshire ; in-8°, Mytau (et Paris, 1790).

1783. — W. Bray, Sketch of a tour into Derbyshire and Yorkshire ; in-8°, Londres, 2e édit., 402 p. (1re édit. en 1777).

1789. — J. Pilkington, A view of the present state of Derbyshire ; 2 vol. in-8°, 2e édit. en 1803.

1795. — Aikin, Description of the Country 20 to 40 miles round Manchester ; Londres, in-4°.

1797. — Faujas de Saint-Fond, Voyage en Angleterre ; in-8°, 2 vol., Paris.

1802. — J. Mawe, The mineralogy and geology of Derbyshire ; in-8°, Londres.

1806. — W. Camden, Britannia ; Londres, in-f°.

1811-1815. — J. Farey, A general View of the agriculture and minerals of Derbyshire ; Londres, in-8°.

1822. — Conybeare and Phillips, Outlines of the geology of England and Wales; Londres, in-8°.

1826. — Dufrénoy et de Beaumont, Mines de plomb du Cumberland et du Derbyshire; *Annales des Mines*, t. XII, p. 339.

1827. — Dufrénoy et de Beaumont, Voyage métallurgique en Angleterre; in-8°, Paris; 2e édit., 1836-1837.

1830. — Ainsworth, On the caverns of the N. E. district of the High-Peak ; *Edinburgh Journal nat. geogr. science*, t. II, p. 168.

1842. — Daubeny, On the occurence of fluorine in Bones; *Philosophical Magazine*, 3e série, t. XXV, p. 122.

1845. — Alsop, On the toadstones of Derbyshire ; *Rep. of the Brit. assoc. for Advanc. of Science*, p. 51.

1852. — (Anonyme), Caves and Mines of the Earth ; Londres, *Religious Tract Society*, in-12.

1854. — Robertson, A handbook to the Peak of Derbyshire; Londres, in-8°.

1859. — Yates (J.), On the mining operations of the Romans in Britain ; *Proceed. of the Somerset Archeolog. and Natur. Hist. Soc.*, vol. XVIII.

1862. — Taylor (J.), Geology of Castleton ; *Transactions of the Manchester geological Society*, vol. III, p. 73, et *Geologist*, vol. V, p. 86-89.

1872. — Ramsay, The river courses of England and Wales; *Quarterly Journal of the geolog. Soc.*, vol. XXVIII, p. 148.

1873. — (Anonyme), Peveril of the Peak, a handbook ; Buxton.

1874. — Alport, Description du Toadstone; *Quarterly journal of the geolog. Soc.*, vol. XXX, p. 551.

1876. — Mello, Hand-Book to the geology of Derbyshire ; in-8°, Londres.

1877. — B. von Cotta, Die Lehre von den Erzlagerstätten ; Freiberg, in-8°.

1878. — Cox, Tourist guide to Derbyshire ; Londres, in-8°.

1879. — Lecornu, Mémoire sur le calcaire carbonifère et les filons de plomb du Derbyshire ; *Annales des Mines*, 7e série, t. XV, p. 1.

1879. — Taylor, The Derbyshire-Caverns, Science gossip; n° 176, p. 173.

1880. — Dawkins (Boyd), Early man in Britain ; Londres, in-8°.

1880. — Stokes, Lead and Lead mining in Derbyshire ; *Transactions of the Chesterfield and Derbyshire institution Engin.*, t. VIII, p. 60 (continué *ibid.* en 1882, t. IX, p. 360).



1882. — De Rance, The water supply of England and Wales; Londres, in-8°.

1887. — Dawkins (Boyd), Geography of Britain in the carboniferous period; *Transac. of the Manchester geological Soc.*, t. XIX, p. 37-58.

1884. — Von Groddeck, Traité des gîtes métallifères (trad. Kuss); Paris, Dunod, in-8°.

1887. — Green, le Neve Foster, Dakyns et Strahan, The geology of North-Derbyshire ; *Memoirs of the geological Survey ;* Londres, Eyre et Spottiswoode, 212 p. et pl. et bibliographie de 16 p. (293 articles).

1887. — Whitaker, Thirteenth Report of the Committee for investigasting the circulation of underground waters. — Avec une bibliographie (p. 383 et 414) chronologique des ouvrages relatifs aux eaux souterraines d'Angleterre et des Galles, depuis 1656. — (Congrès de Manchester de la British Associat. for advancement of science.) — Londres, Murray, 1887. Ces *reports*, publiés depuis 1875 dans chaque *compte rendu annuel* des sessions de la Brit. Assoc. s'occupent surtout des résultats fournis par le fonçage des puits.

1892. — Murray, Handbook of Derbyshire ; Londres, in-12.

1894. — Baddeley, The Peak district, thorough guide ; Londres, Dulau, in-12.

1895. — Heywood, Penny guide to Castleton ; Manchester, in-12.

# TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

Premières études relatives aux cavernes ..... 5
Bibliographie ..... 7
Extension récente des explorations souterraines ..... 8
En Autriche ..... 8
En France. — Les Abîmes ..... 8

PREMIÈRE PARTIE.

**Origine et rôle des cavités souterraines.**

Terrains caverneux ..... 11
ORIGINE DES CAVERNES ..... 11
Lithoclases et joints ..... 11
Rôle capital des fissures du sol ..... 13
Cavernes indépendantes de la fissuration ..... 14
Grottes d'explosion volcanique ..... 15
Cavernes de glissement ..... 16
Autres causes invoquées pour l'origine des cavernes. 17
Rôle des failles ..... 18
Action des eaux dans les cavernes ..... 19
Origine des eaux souterraines ..... 19
Infiltration et ruissellement ..... 20
Eaux thermales. — Inaccessibilité de leurs canaux ... 20
Réfutation de l'origine geysérienne des abîmes ..... 21
Terra Rossa. — Décalcification ..... 23

ÉTUDE DES EAUX DANS LES CAVERNES ..... 23
Pénétration profonde par les abîmes ..... 24
Trois causes d'arrêt au fond des abîmes ..... 25
Érosion et corrosion. — Leur simultanéité ..... 28
L'érosion domine dans les grottes marines ..... 29
Preuves de la corrosion ..... 31
Cupules et rainures. — Roches *mangées* ..... 31
Amas d'argiles rouges ..... 34
Dépôts extérieurs de tufs ..... 34
Preuves de l'érosion ..... 35
Décollements ..... 35
Coupoles des voûtes ..... 36



Pages.

CIRCULATION DES EAUX DANS LES CAVERNES ..... 36
Pénétration dans le sol ..... 36
Suintement. — Absorption. — Entonnoirs. — Goules. — Abîmes ..... 36, 37
Origine des abîmes ..... 38
Creusement superficiel de haut en bas ..... 39
Orgues géologiques ..... 39
Effondrements ..... 39
Théorie du jalonnement ..... 41
Cloups et dolines. — Confusions et controverses .... 42
Kesselthäler et bassins fermés ..... 45
Vallées inachevées ..... 47
Rivière de Gort (Irlande) ..... 48
Sluggas ..... 49
Vallées formées par des effondrements de cavernes. 50
Écoulement de l'eau à l'intérieur des terrains fissurés ..... 54
Absence des *nappes* d'eau ..... 54
Issues des eaux. — Sources ..... 56
Siphons. — Sources vauclusiennes ..... 56
Fausses sources ..... 58
Rivières souterraines sans siphons ..... 59
Sources intermittentes régulières (périodiques) ..... 59
Sources intermittentes irrégulières (temporaires) ... 59

RECHERCHES DIVERSES A EFFECTUER ..... 59

DEUXIÈME PARTIE.

**Variations climatériques des cavernes.**

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE ..... 60
Anomalies observées ..... 61

TEMPÉRATURE ..... 62
Ses variations ..... 62
Anomalies géothermiques des abîmes ..... 62

ACIDE CARBONIQUE ..... 63

VARIATIONS DU NIVEAU DES EAUX ..... 64
Leur subordination aux précipitations atmosphériques .... 65
Vitesse des rivières souterraines. — Colorations ..... 66
Activité de l'évaporation souterraine ..... 67
Régularisation de l'infiltration par le reboisement .. 68
Trop-pleins et sources temporaires ..... 69
La Bonnette et l'Oule (Lot) ..... 69

TROISIÈME PARTIE.

**Les cavernes du Peak (Derbyshire) et leurs filons métallifères.**

Pages.

Relation des cavités naturelles avec les filons ..... 70
Données fournies par les abimes ..... 71

Peak-Cavern ..... 72
Formation. — Régime hydrologique ..... 73
Recoupement d'un aven (Victoria-Cave) ..... 77
Sources de Peak-Cavern ..... 80
Dissemblances de températures ..... 80

Speedwell-Mine ..... 82
Recoupement de filons et d'un abime ..... 83
Siphon absorbant ..... 84

Blue-John-Mine ..... 85
Gisement et exploitation de la fluorine ..... 86
Circulation d'eaux souterraines ..... 89
Origine de la fluorine ..... 91
Toadstones éruptifs ..... 92
Remise en mouvement par les eaux ..... 93
Filons transformés en cavernes par l'infiltration ..... 94

Bibliographie des cavernes et mines du Derbyshire ..... 95



# POMPES SANS PISTON

A

# TRANSMISSION PNEUMATIQUE

Par M. de MONTRICHARD, Inspecteur des forêts.

## Introduction.

La suppression du piston solide dans les machines élévatoires est depuis longtemps l'objet des recherches des constructeurs. Ce piston est, en effet, un organe qui, par ses frottements, ceux de sa tige, par les fuites qui se produisent sur son périmètre, etc., absorbe beaucoup de travail.

Pour se rendre compte de l'importance de ces pertes, dans la pratique, il suffit d'ouvrir un catalogue de pompes alimentaires à action directe. Dans ces machines, la résistance du courant d'eau qui doit être refoulé dans la chaudière est sensiblement égale à la pression de la vapeur dans la même chaudière, et la vapeur agit à pleine pression. Cependant les sections du piston à vapeur et du piston à eau présentent les rapports minima suivants :

2,25 et au dessus pour les pompes du débit de 1 litre par seconde ;

2,00 et au dessus pour les pompes du débit de 2 litres par seconde ;

1,70 et au dessus pour les pompes du débit de 5 litres par seconde.

Ces rapports donnent assez approximativement les pertes imputables au mécanisme solide.

Les machines à air subissent des pertes de travail de même nature.

Dans son rapport au congrès de mécanique appliquée de 1889, M. William Donaldson estime que le travail de la machine motrice dépasse de 20 p. 100 environ celui de la compression de l'air, avec les grands compresseurs les mieux construits ; mais que cette perte est beaucoup plus importante avec les petits compresseurs, et que, si l'on tient compte des fuites, il faut majorer d'au moins 25 p. 100 le travail de compression pour évaluer la puissance minima de la machine motrice.

Pour tenir compte des pertes dues au piston à vapeur, il faut augmenter encore de 25 p. 100 le résultat précédent, et attribuer aux compresseurs les mieux établis le coefficient 1,56 comme rapport du travail dépensé par les pistons au travail qu'exigeraient des pistons parfaits ; et aux compresseurs ordinaires le coefficient 1,60.

Mais l'emploi de l'air comprimé implique l'usage d'une machine élévatoire. Il faut donc ajouter, aux pertes dues aux pistons du compresseur, celles provenant des pistons de cette seconde machine, ce qui donne les rapports suivants :

Pour les petites installations : minimum, $2{,}25 \times 1{,}60 = 3{,}60$
Pour les grandes d° minimum, $1{,}70 \times 1{,}56 = 2{,}65$

D'où l'on peut conclure que, dans les transmissions par l'air, les vices des pistons solides entraînent une dépense de travail au moins triple de celle qu'exigeraient des pistons parfaits, dans la plupart des cas, et peu inférieure à ce chiffre dans les grandes installations les plus soignées.

Ces considérations justifient les nombreuses tentatives faites par les constructeurs pour s'affranchir du piston solide.



Les essais dont nous présentons les résultats ont pour unique objet l'élévation des eaux. Commencés en 1888, ils ont porté sur des appareils, qui ont subi de nombreuses transformations, généralement dans le sens de la simplification, de sorte que la description des premiers dispositifs expérimentés serait sans intérêt. En dernier lieu, notre outillage se composait de deux compresseurs à mouvement elliptique mus à bras, d'un compresseur du même genre actionné par un moulin à vent, d'un compresseur à piston liquide actionné par la vapeur et des pompes sans piston représentées ci-après *fig.* 1, 5 et 6.

Le moulin à vent, qui fonctionne depuis 1891, élève à 16 mètres de hauteur l'eau d'un puits de 10 mètres de profondeur situé à 80 mètres du moulin.

Les machines à mouvement elliptique sont connues ; employées aujourd'hui dans plusieurs industries, elles ont été décrites par le *Génie Civil*, 21 avril 1888 et 10 février 1894, *l'Industrie Moderne*, 2 décembre 1888 et 1er avril 1894, *la Revue Illustrée des Machines* (Armengaud) 1889, *le Portefeuille Économique des Machines*, janvier 1890 et novembre 1894, *la Revue technique de l'Exposition de* 1889, septième partie.

Les pompes sans piston peuvent, d'ailleurs, recevoir l'air comprimé d'un *compresseur quelconque;* elles peuvent notamment être introduites dans une installation à air comprimé déjà existante ; leur description n'implique donc pas celle des compresseurs employés dans nos essais. C'est pourquoi nous limiterons aujourd'hui notre travail à un objet nettement circonscrit : *la pompe sans piston actionnée par l'air.*

### Description des appareils.

Dans cet appareil, *fig.* 1, l'air, qui pénètre par la conduite M et s'échappe par la conduite N, agit direc-

tement sur le liquide pompé, qui est admis par le clapet A et émis par le clapet E.

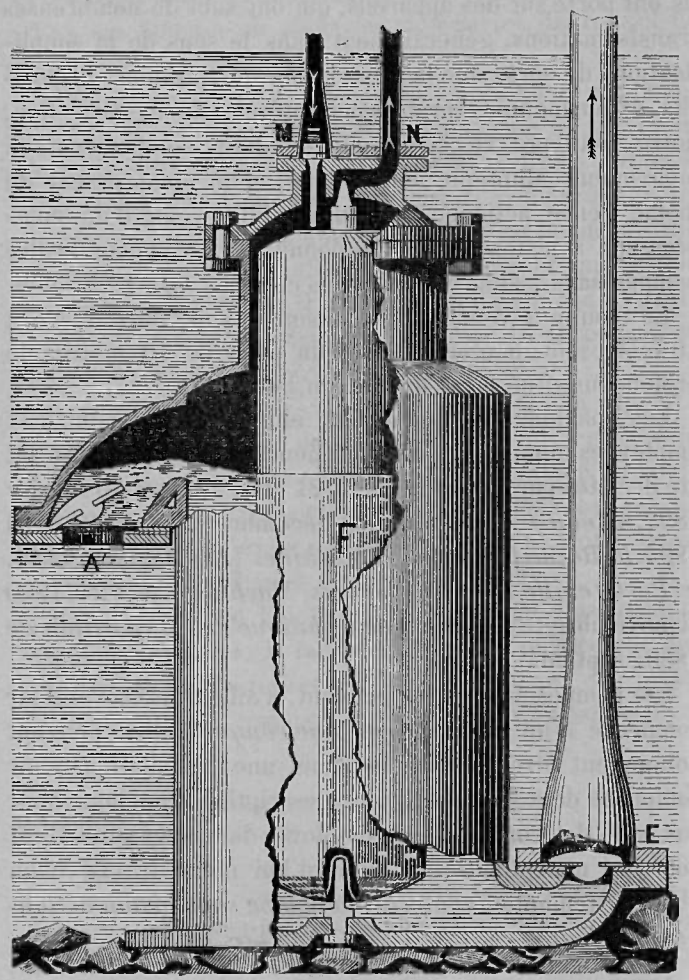



FIG. 1.

La *distribution* d'air se fait par des soupapes M, N, actionnées par un flotteur F, qui, en montant, ferme la soupape N et ouvre la soupape M, et, en descendant, ferme la soupape M et ouvre la soupape N. *C'est le flotteur seul qui ouvre les soupapes ; le courant d'air, au contraire tend à les maintenir fermées.* Il en résulte que ces soupapes ne fonctionnent que lorsque le va-et-vient de la surface liquide de part et d'autre du *niveau de flottaison* présente une amplitude suffisante pour que les poussées et les tractions du flotteur sur les soupapes puissent surmonter la résistance de l'air comprimé. Si nous supposons l'appareil plongé dans l'eau (*fig.* 1), l'eau pénètre spontanément dans l'appareil, chassant l'air par la soupape N; le liquide monte au-dessus du niveau de flottaison F du flotteur; la poussée ascendante qui en résulte soulève la soupape M, en même temps que la soupape N se ferme. Alors l'air comprimé pénètre dans l'appareil et refoule l'eau; le liquide descendant au-dessous du niveau de flottaison F, le flotteur tire la soupape N et laisse tomber la soupape M; l'air s'échappe, et l'eau pénètre de nouveau dans l'appareil, où se reproduisent les phases déjà décrites.



L'emploi d'un *réchauffeur* de l'air comprimé augmentera considérablement le rendement (*). Ce réchauffeur R, *fig.* 2, pourra être installé à un point quelconque de la conduite d'air comprimé.

Dans les puits profonds, on divisera la hauteur en échelons, *fig.* 2, s'alimentant les uns les autres.

Il faut prévoir que le débit d'un appareil ne sera pas strictement égal à celui de l'appareil voisin, d'où il résulte que la solidarité absolue des appareils aurait pour effet de suspendre la marche de l'un, au moment où l'autre passerait de l'admission à l'émission, ou inversement. On donnera à la marche des appareils toute l'élasticité nécessaire en prolongeant la conduite de refoulement de chaque

(*) Voir *Ann. des Mines*, 9e série, t. V, p. 495.

appareil jusqu'au réservoir ouvert H (*fig.* 2 et 3), placé plus haut que l'appareil immédiatement supérieur. Lorsque le niveau s'élèvera dans ce réservoir, l'appareil alimenteur ralentira sa vitesse ou s'arrêtera par l'effet de la surcharge, tandis que l'admission s'accélèrera dans l'appareil alimenté, ou inversement, jusqu'à ce que le débit de tous les appareils devienne identique dans un temps donné.

L'appareil *fig.* 1 peut être installé au-dessus de l'eau et fonctionner par aspiration, à condition que l'élévation ne dépasse pas la hauteur pratique d'environ 8 mètres au-dessus du niveau de l'eau à épuiser. La conduite d'aspiration doit être installée sur la conduite N, et, lorsque l'appareil est plein d'eau, la soupape M s'ouvre, la soupape N se ferme, et l'eau s'écoule par le clapet E. Si le dégorgeoir est assez bas pour que la surface liquide descende jusqu'à la limite inférieure de sa course, la soupape M se ferme, la soupape N s'ouvre de nouveau, et l'aspiration recommence.

Nous rappellerons ici que, si la limite pratique de l'élévation réalisable par aspiration est d'environ 8 mètres, le *maximum d'effet utile d'une machine travaillant par aspiration correspond à une raréfaction de* $\frac{1}{3}$ *d'atmosphère*, soit une élévation d'environ 6 mètres de hauteur d'eau (*).

L'eau élevée à 6 mètres de hauteur par aspiration, dans un premier appareil, peut être dirigée de même dans un second appareil, à 6 mètres plus haut, puis dans d'autres constituant un chapelet d'appareils fonctionnant tous par aspiration et s'alimentant les uns les autres.

Dans les puits profonds, ce système présenterait l'inconvénient de nécessiter de nombreux appareils. Mais il n'exige qu'une seule conduite d'air et n'entraîne pas de

(*) *Annales des Mines*, 9e série, t. V, p. 506.



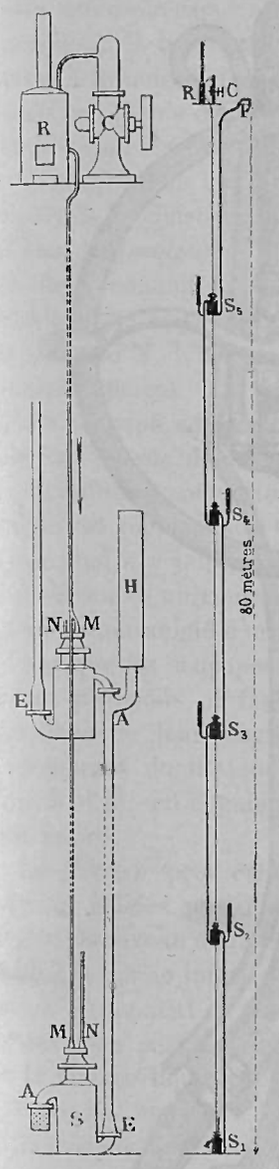



Fig. 2.

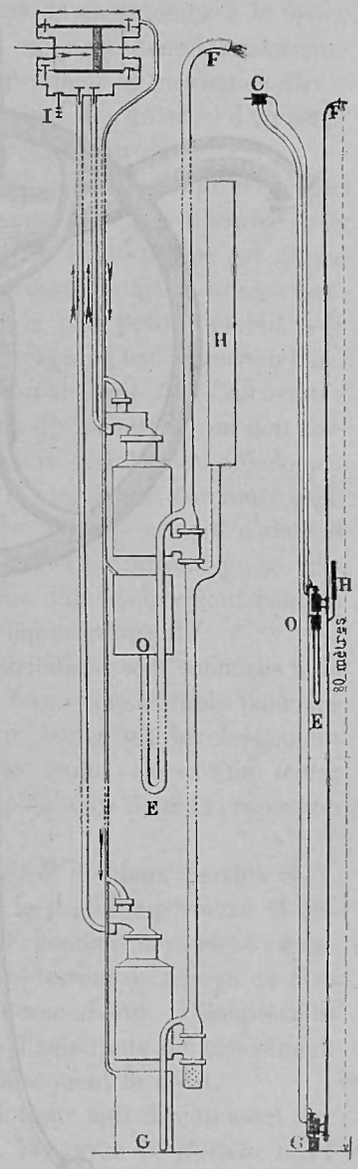



Fig. 3.

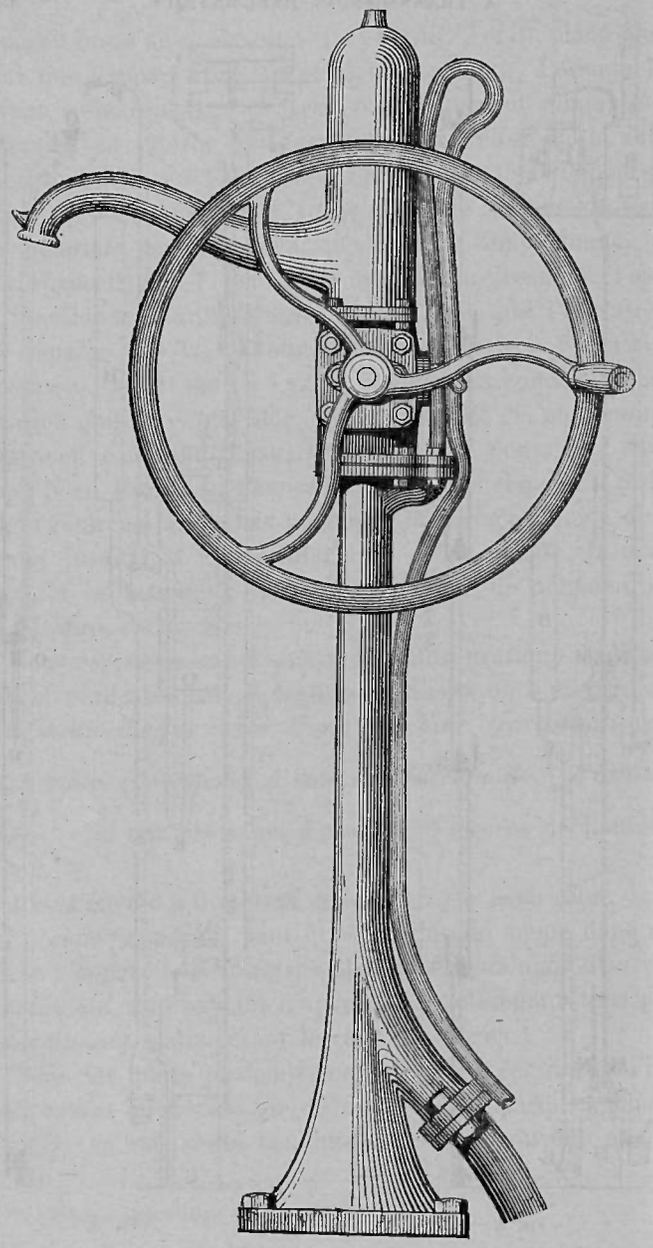


Fig. 4.



perte de détente, l'air entrant dans l'appareil à la pression atmosphérique et sortant de la machine à la même pression. Il trouverait donc sa place dans les transmissions à grande distance, pour faibles et moyennes élévations, en pleine campagne ou dans des galeries d'un accès facile, dont il serait utile de renouveler l'air.

L'emploi d'un appareil de ce genre formant relai nous a permis de construire *une pompe* (*fig.* 4) *qui aspire l'eau d'une profondeur de* 15 *mètres*. Cette pompe est munie de deux conduites: la plus grosse établit la communication avec le clapet E du relai, la plus petite l'établit avec la soupape N. L'une donne passage à l'eau; l'autre à l'air, successivement. La conduite d'air doit être surmontée d'une soupape empêchant l'eau d'y pénétrer, ou doit former au-dessus de la pompe une boucle d'un développement suffisant pour atteindre le même but, car toute aspiration est supprimée si cette conduite se remplit d'eau, et l'eau tend à y jaillir par l'effet des pulsations qui se produisent entre un courant animé d'un mouvement continu et un piston animé d'un mouvement alternatif.

Lorsque les soupapes du distributeur sont soumises à de fortes pressions, il faut une force considérable pour les détacher de leur siège. Pour éviter un développement encombrant du flotteur, on le munit alors d'un *levier* (*fig.* 5 et 6), qui augmente sa puissance dans la proportion nécessaire.

Le *flotteur* peut être composé de deux parties G, I, (*fig.* 5) reliées par une tige, la partie supérieure G au-dessus du niveau de flottaison F donnant la poussée ascendante, la partie inférieure I au-dessous du niveau de flottaison F donnant la traction descendante. L'éloignement de ces deux parties augmente l'amplitude du mouvement de la surface liquide et par conséquent le débit.

Dans les appareils où le flotteur agit directement sur les soupapes du distributeur, la *course du flotteur* n'est

que de quelques millimetres ; le jeu du distributeur est

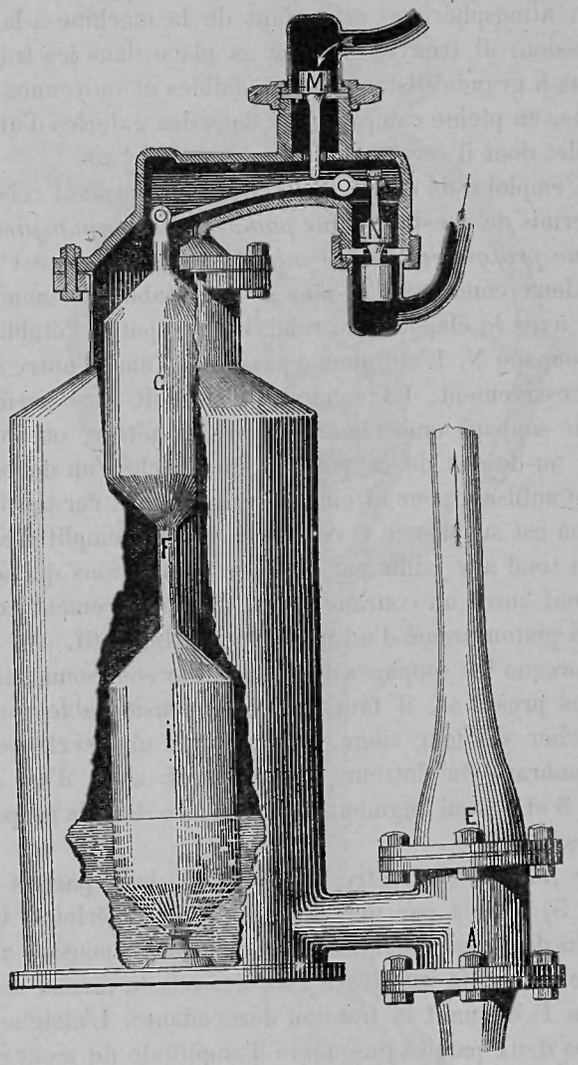



Fig. 5.

donc rapide, et le choc du flotteur est suffisamment amorti



par la rondelle de caoutchouc qui garnit les soupapes ; mais, lorsque le flotteur est monté sur levier, sa course atteint plusieurs centimètres, et, si le choc est négligeable dans les petits appareils, il n'en sera pas de même dans les grands. Alors on interposera un ressort entre le levier et le flotteur ; ce ressort aura pour effet d'amortir le choc, et aussi de précipiter le mouvement du levier, attendu qu'il se détendra dans le sens utile au jeu des soupapes, dès que la soupape résistante sera détachée de son siège.

Les appareils *fig.* 1 et 5 peuvent, comme le premier, fonctionner par *refoulement* ou par *aspiration*.

L'appareil *fig.* 6 peut aussi fonctionner par aspiration et refoulement d'air combinés, et avec courant de *refoulement d'eau continu*. A cet effet, on y ajoute un récipient O, qui communique, d'une part, avec la conduite d'air comprimé M (*fig.* 3 et 6), d'autre part, avec la conduite de refoulement d'eau E. Lorsque le refoulement se produit, une partie de l'eau monte dans la conduite E ; une autre partie descend dans le réservoir O, qui se remplit. Lorsque la soupape M se ferme, le courant d'air comprimé passe dans le réservoir O et en refoule l'eau qui avait pénétré pendant la période précédente. — Enfin, la soupape M s'ouvre de nouveau, et les récipients O et R étant alors en communication directe par le côté eau et le côté air, le réservoir O se remplit d'eau, et l'air comprimé passe dans la pompe. Il y a donc courant continu dans la conduite d'air comprimé et dans celle de refoulement d'eau.

Le *réservoir* O sert, en outre, de magasin à l'air comprimé pendant la période d'aspiration, et la pression est limitée dans chaque appareil à la hauteur des colonnes d'eau refoulées EF, GH (*fig.* 3). Lorsque plusieurs appareils sont branchés sur la même conduite d'air comprimé, la limite de pression de tous les appareils est celle de la colonne d'eau la moins élevée GH.

*Lorsque l'air, après son échappement, est ramené par*

*la conduite* N *au compresseur, sa détente profite à la machine motrice et lui rend une grande partie du travail de compression* (*fig.* 3).

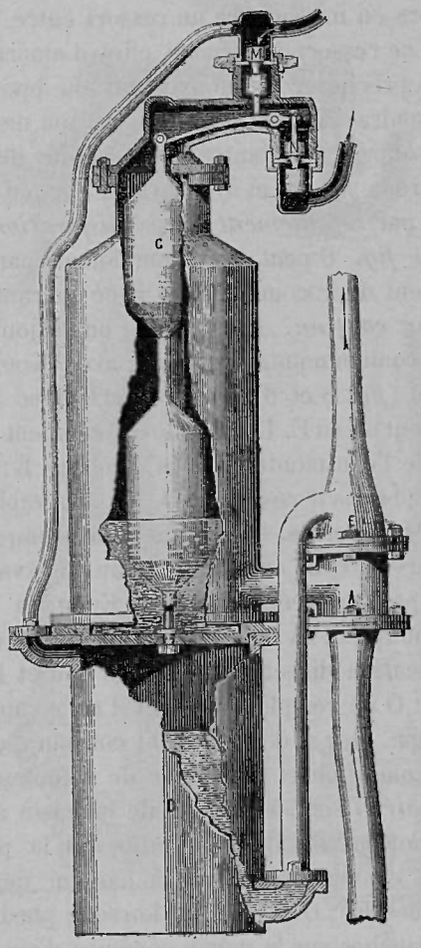



Fig. 6.

Si l'on désigne par $p$ la pression maximum de l'air dans l'appareil ; par V le volume d'air qui produit une période



d'écoulement ; par $v$ la capacité de la conduite de retour de l'air à la machine motrice ; par $k$ le rapport 1,40 des chaleurs spécifiques à pression et à volume constants ; lorsque, la soupape N s'ouvrant, l'air s'est répandu dans la conduite de retour (nous négligeons la petite quantité d'air qui se trouvait encore dans la conduite de retour avant l'échappement), la pression tombe à :

$$p\left(\frac{V}{V+v}\right)^k;$$

si V est très grand et $v$ très petit, le rapport $\frac{V}{V+v}$ est très voisin de 1, et la chute de pression très faible.

Le retour d'air a aussi pour conséquence de réduire notablement l'élévation de température produite par la compression, l'air à son entrée dans le compresseur étant déjà sous pression, au début à la pression $p\left(\frac{V}{V+v}\right)^k$, qui peut être très voisine de $p$ et à la fin de la période seulement à la pression atmosphérique (ou à celle d'aspiration lorsque le premier appareil est hors de l'eau). L'abaissement de la température produit par la détente est faible aussi, pour les mêmes motifs. Il en résulte que l'écart entre la température de l'air comprimé et celle de l'air détendu est assez peu important pour que l'emploi d'un réchauffeur d'air soit sans objet (Voir ci-après le chapitre *Construction*).

Dans une installation avec aspiration et refoulement, l'air parcourt *un cycle fermé ;* mais il faut prévoir des pertes d'air par fuites, dissolution dans l'eau, etc. Pour combler ces pertes, il suffira d'une soupape d'*admission de l'air atmosphérique* I (*fig.* 3), réglée de manière à ne donner accès à l'air que sous l'effet d'une aspiration plus forte que celle qui est nécessaire pour remplir d'eau l'appareil. — Il en résulte que celui-ci se remplira d'eau,

et que l'air atmosphérique ne pénétrera dans le cycle que, lorsque, la soupape N étant fermée, il sera nécessaire d'envoyer encore de l'air dans l'appareil pour combler des déficits du côté du refoulement.

Les appareils à retour d'air ne peuvent être installés en chapelet qu'à la condition de posséder chacun une conduite de retour d'air particulière isolée des autres conduites par une soupape d'émission aussi voisine que possible de la machine motrice. Mais ils peuvent être commandés tous par la même conduite d'air comprimé (*fig.* 3).

En ce qui concerne les conduites d'eau, on adoptera la disposition déjà indiquée pour les appareils à courant intermittent. Mais on remarquera que l'air fourni aux réservoirs O n'est emprisonné que par les colonnes d'eau GH ou EF (*fig.* 3), de sorte que la pression de l'air ne dépassera pas celle de la plus petite des colonnes d'eau GH,EF, et qu'elle doit être au moins égale à la pression de la plus petite des colonnes d'eau OF, c'est-à-dire qu'on doit avoir :

$$OF < GH < EF.$$

Nous avons vu qu'*on peut atteindre de grandes élévations d'eau avec de l'air comprimé à basse pression*; le problème inverse peut se présenter : *introduire dans une installation d'air comprimé à moyenne pression une pompe pour faible élévation d'eau*. En ce cas, on placera sur la conduite d'air comprimé une soupape de réduction de pression, ou l'on fera détendre l'air dans la pompe même en employant le type à levier (*fig.* 5) de la manière suivante. On laissera, entre l'écrou qui soulève la soupape N et la fourche du levier, un certain jeu, de manière à permettre au flotteur de descendre dès que la surface liquide dépassera le niveau de flottaison assez pour laisser fermer la soupape M ; ce sera la période d'admission. Puis le piston liquide continuera à descendre jusqu'à ce que sa traction devienne assez forte pour soulever la soupape N ; ce sera la période de détente. — La proportion de l'admission et de la détente n'est donc plus qu'une question de calcul de la situation du niveau de flottaison et de celle du niveau inférieur de la course de la surface liquide. On ne devra pas perdre de vue que la détente dans la pompe même entraînera souvent la nécessité de réchauffer l'air comprimé avant son entrée dans la pompe.



### Construction d'une installation de pompes sans piston.

Nous indiquerons par un exemple comment peut être établi le calcul des organes spéciaux aux pompes sans piston.

Supposons qu'il s'agisse d'élever 10 mètres cubes d'eau par heure à 80 mètres de hauteur.

Nous comparerons deux types d'installations :

La première, composée d'*appareils à courant intermittent fonctionnant à basse pression et sans détente* ;

La seconde, composée d'*appareils à courant continu fonctionnant à moyenne pression, avec retour d'air au compresseur*, pour utiliser la détente.

Nous nous donnerons, comme limite de la dépense de travail affectée aux excédents de longueur des conduites de refoulement et aux frottements de l'air et de l'eau, 25 p. 100 en sus de la hauteur à atteindre, au total une pression maximum de 100 mètres de hauteur d'eau, sous laquelle devront fonctionner les appareils. En outre, les dimensions des organes du distributeur seront établies de manière à comporter des écarts de 50 p. 100 sur les surfaces des soupapes ou les pressions.

1° Installation a basse pression, sans détente et a courant intermittent. — Dans les appareils à courant

intermittent, la *périodicité* sera réglée de manière à donner au refoulement une durée plus longue qu'à l'aspiration, soit pour le refoulement les $\frac{2}{3}$ de la durée de la période, et pour l'aspiration seulement le $\frac{1}{3}$ de cette durée.

La conduite de refoulement devra donc débiter en moyenne 10 mètres cubes en quarante minutes, et celle d'aspiration 10 mètres cubes en vingt minutes, d'où nous concluons que la conduite de refoulement pourra présenter un diamètre d'environ 65 millimètres, et celle d'admission un diamètre d'environ 80 millimètres.

La pression de 100 mètres sera répartie également sur cinq appareils.

Les *conduites d'air* devront fournir par seconde, au sortir du compresseur, les 15 litres d'air comprimé nécessaires à la marche des cinq appareils, plus un certain excédent pour combler les déficits provenant des fuites, des espaces libres et de la dissolution de l'air dans l'eau, en nombre rond, au total, 20 litres.

Le volume d'air transmis diminue à chaque relai, de sorte que si l'on donne aux conduites 30 millimètres de diamètre au sortir du compresseur, il suffira de 20 millimètres entre les deux appareils le plus éloignés.

Il semble suffisant de donner aux soupapes du distributeur un diamètre de 20 millimètres, couvrant un orifice de 16 millimètres.

Sur chacune d'elles, la pression de l'air, majorée de 50 p. 100, restera donc inférieure à $9^{kg},5$.

Un *flotteur* cylindrique de 160 millimètres de diamètre semble approprié à la puissance de ces appareils. Ce flotteur devant exercer une poussée de $9^{kg},50$ et, successivement, une traction descendante de $9^{kg},50$, son volume au-dessus de la ligne de flottaison devra être d'au moins $9^{lit},50$ et autant en dessous, soit une hauteur



de $0^{m},48$ en dessus de la ligne de flottaison et d'au moins $0^{m},48$ en dessous.

On remarquera toutefois que, la pression pouvant descendre à près de $\frac{80}{5} = 16$ mètres de hauteur d'eau, il pourra arriver que la pression sur la soupape d'admission d'air ne dépasse pas de beaucoup $3,14 \times 1,6 = 5$ kilogrammes ; en ce cas, il suffirait que le liquide immerge un volume du flotteur de 5 litres, pour que la distribution fonctionne. On devra donc *rétrécir le récipient* à partir de la hauteur de $\frac{5^{dcm}}{2} = 2^{dcm},50$ au-dessus du niveau de flottaison, afin de réduire l'espace nuisible.

D'après ce qui précède, la *course* du piston liquide sera au moins de $0^{m},25$ de part et d'autre du niveau de flottaison, au plus de $0^{m},48$.

Plus la *périodicité* des écoulements sera longue, moins on aura de force vive à dépenser; mais une périodicité de trente secondes, dont dix pour l'admission et vingt pour le refoulement, paraît pratiquement bien suffisante pour le débit demandé ; il faudra donc un débit par période d'environ 90 litres, ce qui, pour une course de $0^{m},50$ du piston liquide, implique un diamètre de $0^{m},50$.

Ces chiffres suffisent pour établir le plan d'un appareil dont le plus grand diamètre sera d'environ $0^{m},50$, et la hauteur totale d'environ $1^{m},10$.

Pour évaluer la *puissance motrice*, nous nous placerons dans les conditions les plus défavorables, admettant une élévation de température dans le compresseur égale à celle que produirait théoriquement le travail adiabatique, et un refoulement, à la température ambiante, sans utilisation de la détente.

Les rapports théoriques de ces deux quantités sont :

| Rapport des pressions | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Élévation d'eau correspondante | 5 m. | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 70 | 90 | 140 |
| Rapports du travail de compression adiabatique au travail de refoulement isothermique. | 1,28 | 1,67 | 2,08 | 2,63 | 2,94 | 3,33 | 3,85 | 4,55 | 5,55 |

La quantité d'air à refouler est, par seconde, de 20 litres, sous pression de 2 kilogrammes, soit, pour le refoulement seul, 400 kilogrammètres.

Nous avons déjà tenu compte des pertes de travail dues aux frottements, aux fuites, etc., en imputant des excédents au volume d'air et à la charge d'eau ; le travail de compression nécessaire sera donc :

$$400 \times 2{,}08 = 832 \text{ kilogrammètres.}$$

L'emploi d'un *réchauffeur* est ici nettement indiqué.

M. Kennedy a constaté qu'en chauffant l'air à 160° la puissance indiquée d'un moteur passe de 39 à 54, soit un rapport d'environ 1,40.

L'emploi d'un réchauffeur permettrait donc de réduire à $\frac{832}{1{,}40} = 590$ kilogrammètres le travail à transmettre par le compresseur.

Augmentons ce chiffre de 56 p. 100 pour tenir compte des résistances passives d'un piston compresseur et d'un piston à vapeur, et nous trouvons pour *travail indiqué* de la machine à vapeur $590 + 330 = 920$ kilogrammètres.

La puissance de la machine motrice devra donc être de $\frac{920}{75} = 12$ à 13 chevaux indiqués.

Dans les installations à basse pression, on pourra employer comme compresseur une pompe à mouvement elliptique reliée par une courroie à un arbre moteur



quelconque. En ce cas, et dans d'autres circonstances analogues, il peut être utile de se rendre compte du *travail mesuré au frein* qui sera nécessaire pour la marche du compresseur. Il suffit alors d'ajouter, au travail moteur 590 kilogrammètres calculé plus haut, 25 p. 100 représentant les pertes imputables à un seul piston, ce qui donne $590 + 142 = 732$ kilogrammètres, ou environ 10 chevaux.

*Le rapport du travail moteur au travail effectif est* $\frac{732}{3 \times 80} = 3$.

2° INSTALLATIONS A MOYENNE PRESSION, AVEC RETOUR D'AIR AU COMPRESSEUR ET COURANT DE REFOULEMENT CONTINU. — Les moyennes et hautes pressions présentent dans la pratique des difficultés provenant des variations de la température de l'air par l'effet de la compression et de la détente. En fait, l'élévation de température produite par la compression adiabatique est limitée par la présence de l'eau.

| Rapports des pressions | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Température initiale : 15° centigrades | | | | | | | | | | |
| Température finale centigrade : après compression | + 15° | + 78 | + 125 | + 156 | + 185 | + 211 | + 233 | + 254 | + 271 | + 285 |
| Température finale centigrade : après détente | + 15° | − 37 | − 60 | − 80 | − 92 | − 102 | − 109 | − 116 | − 121 | − 125 |
| Température d'ébullition de l'eau pour le nombre d'atmosphères indiqué par les rapports ci-dessus. | + 100 | + 120 | + 134 | + 144 | + 152 | + 160 | + 165 | + 171 | + 176 | + 180 |

Il en résulte que, pour éviter la formation de glaçons dans les moteurs-pompes, par l'effet de la détente, on les fait marcher ordinairement sans détente, afin que le givre soit lancé au dehors par l'échappement de l'air.

Pour étudier une application de pression moyenne, nous diviserons la hauteur de 80 mètres, que nous nous sommes proposé d'atteindre, en deux sections égales, et, admettant comme précédemment un excédent d'une

vingtaine de mètres pour les charges diverses, nous établirons nos calculs pour une hauteur totale de 100 mètres d'eau divisée en deux, soit en nombres ronds une pression de 5 kilogrammes, ou 6 atmosphères, dans chaque appareil.

Nous calculerons aussi les *organes du distributeur* avec l'hypothèse d'un écart accidentel de 50 p. 100 sur les surfaces des soupapes. Le diamètre de 20 millimètres semble encore suffisant pour les soupapes du distributeur, ce qui porte la pression de l'air sur chacune d'elles, majorée de 50 p. 100 à 23 kilogrammes.

Si le *flotteur* a le même diamètre que le premier, 160 millimètres, section 2 décimètres, et si nous ne voulons pas dépasser, pour sa hauteur, 1 mètre, le rapport des bras du *levier* intermédiaire devra être $\frac{23 \times 2}{20} = 2{,}3$.

La *hauteur totale de l'appareil* sera d'environ $1^{m},10$; le *rétrécissement* commencera à une hauteur au-dessus du niveau de flottaison de $\frac{3{,}14 \times 4}{2{,}3 \times 2} = 2^{dcm},7$.

Le courant étant continu dans les *conduites de refoulement*, un diamètre de 55 millimètres semble suffisant; celui de 80 millimètres entre le réservoir alimenteur et la tubulure d'admission, où le courant est intermittent et de courte durée, assurera une admission rapide.

Nous avons vu que, dans un appareil à courant continu, l'air n'est retenu que par les colonnes d'eau EF, GH (*fig.* 3) et que la pression de l'air doit être au moins égale à celle d'une colonne d'eau de hauteur OF et ne dépasse pas celles de hauteur EF, GH.

*La hauteur* GH *doit être intermédiaire entre les hauteurs* OF *et* EF. Donc nous donnerons à GH la hauteur de 44 mètres : par exemple, à OF celle de 41 mètres, à EF celle de 45 mètres.

La courbe de 4 mètres de profondeur au-dessous du



réservoir O de l'appareil supérieur parait largement suffisante pour assurer le fonctionnement du système.

Dans le cas où l'on composerait un chapelet d'un plus grand nombre d'appareils, les mêmes bases seraient applicables aux dimensions des autres appareils.

Nous avons vu qu'au point de vue du rendement il y a avantage à construire des appareils de grande dimension, avec des *conduites de retour* de petite capacité. Nous réduirons le diamètre de celles-ci à 20 millimètres, soit une capacité de $31^{lit},40$ pour une conduite d'environ 100 mètres de longueur, et de $13^{lit},80$ pour une conduite d'environ 60 mètres de longueur.

En présence de ces chiffres, un volume d'air de 240 litres parait suffisant pour réaliser une assez faible chute de pression. La course de la surface liquide étant de $0^{m},50$, cela nous conduit au diamètre de $0^{m},80$.

Lorsque l'air se répandra dans la conduite de retour (et nous négligeons l'air qu'elle renferme encore à ce moment), la pression tombera à :

$$6 \times \left(\frac{240}{240 + 31{,}4}\right)^{1{,}40} = 6 \times 084 = 5{,}04 \text{ dans l'un des appareils}$$

et à

$$6 \times \left(\frac{240}{240 + 168}\right)^{1{,}40} = 6 \times 0{,}90 = 5{,}40 \text{ dans l'autre.}$$

Pour une compression de 1 à 6, la détente utilisée sera donc de $\frac{5{,}04 + 5{,}40}{2} = 5{,}22$ à 1.

Or, nous avons vu (p. 118) que le rapport du travail de compression adiabatique au travail de refoulement isothermique est :

3,33 pour un rapport des pressions égal à 6
2,94 — — 5

Le *travail restitué par la détente* de 5,2 à 1 est donc d'au moins 2,94 ; d'où il suit que la perte entre la compression et la détente serait de moins de $3{,}33 - 2{,}94 = 0{,}39$ du travail de refoulement isothermique.

Le *travail de refoulement isothermique* est égal à la somme des débits des deux appareils, 6 kilogrammes, majorée de $\frac{1}{3}$ environ pour tenir compte des fuites, pertes d'air diverses, et multipliée par la hauteur 50 ; soit

$9 \times 50 =$ ..... 450 k.m.

ajoutant 0,39 de ce travail, soit ..... 175 k.m.

pour tenir compte des pertes dues à la compressibilité de l'air, total ..... 625 k.m.

puis 56 p. 100 pour le piston à vapeur et celui du compresseur ..... 340 k.m.

nous obtenons le total de ..... 965 k.m.

Si nous laissons en dehors de notre calcul les pertes imputables au piston à vapeur, on trouve comme travail moteur $625 \times 1{,}25 = 781$ kilogrammètres, à dépenser pour un *travail effectif* de $3 \times 80 = 240$ kilogrammètres, de sorte que le *travail moteur* ne serait que *le triple* du travail effectif, tandis qu'avec des machines ordinaires il serait beaucoup plus élevé (*).

La puissance de la *machine motrice* devrait être de $\frac{965}{75} = 12$ à 13 chevaux indiqués, ou 10 chevaux mesurés sur l'arbre.

Au point de vue *thermique*, on remarquera que la compression au début de la période est de 5,2 à 6 ;

à la fin de la période, de 1 à 6 ;

et que l'élévation de température, très faible au début,

(*) Voir les rendements pratiques ordinaires présentés par William Donaldson, au Congrès de mécanique appliquée, *Revue Technique de l'Exposition de* 1889, p. 330, VII^e^ partie.



atteint son maximun à la fin de la période. La moyenne de l'élévation de température est faible, comme on peut le conclure du rapport 1,39 entre le travail de compression adiabatique et le travail de détente adiabatique utilisé. Ce rapport placerait la compression moyenne entre les rapports 1 et 2 du tableau de la page 119.

Si on considère les différences de température comme proportionnelles aux différences des rapports des travaux dans les limites de pression de 1 à 2, cela nous donne, pour une température ambiante de 15°, une élévation de $(78 - 15)\frac{0{,}39}{0{,}67} = 36°$. La température de l'air après compression aurait donc pour maximum $15 + 36 = 51°$.

Si l'on admet que l'air perde la moitié de l'excédent de température acquis au contact des enveloppes, soit $\frac{36}{2}$, entre le compresseur et le piston liquide, il y arriverait à la température de 33° ; et comme la chute de température du fait de la détente serait d'environ 30°, le résultat final serait + 3°.

Dans ce calcul, nous n'avons tenu compte que de la chaleur perdue, et non de celle qui serait fournie par la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air, par les parois humides, etc., de sorte qu'on peut considérer les appareils comme absolument à l'abri de tout accident de glace.

Mais aussi ce calcul nous montre que l'emploi d'un *réchauffeur* n'aurait guère d'autre effet que d'élever au-dessus de la température ambiante la température moyenne du système, l'écart de température entre l'air comprimé et l'air détendu restant voisin de 36°. C'est pourquoi l'emploi d'un réchauffeur semble inutile dans les installations avec retour d'air.

L'appareil inférieur a été représenté sous l'eau, mais il pourrait être installé aussi bien au-dessus de l'eau, la

conduite de retour permettant de procéder par *aspiration*. Il sera bon, toutefois, d'éviter les fortes aspirations, parce que le piston du compresseur n'agit alors que sur des quantités d'air très faibles, d'où résulte la nécessité d'un grand nombre de coups de piston pour un petit effet et, par conséquent, une perte de temps.

### Conclusions.

On atteindrait des hauteurs quelconques avec l'un ou l'autre des types d'installation décrits, dans les mêmes limites de pression et de rendement, en multipliant le nombre des appareils à proportion des hauteurs.

La conduite de retour permet de placer l'appareil le plus bas au-dessus des eaux à épuiser.

Les deux types d'installation présentent à peu près les mêmes rendements, dans les limites de pression que nous avons étudiées.

Les frais de construction ne semblent pas devoir différer notablement.

On peut associer un appareil à courant intermittent (*fig.* 1) à des appareils à courant continu, application qui se présentera notamment lorsqu'on aura besoin d'une partie de l'air comprimé pour l'aérage de mines ou de galeries.

On pourra aussi placer au fond du puits un appareil à basse pression (*fig.* 1) avec aspiration de $\frac{1}{2}$ atmosphère par exemple, permettant de placer l'appareil hors de l'eau et refoulant à 3 atmosphères dans un appareil à haute pression (*fig.* 5 et 6) installé à côté de lui. Celui-ci à son tour refoulerait l'eau à une pression beaucoup plus élevée, 15 atmosphères par exemple, permettant d'atteindre 140 mètres de hauteur d'un seul jet avec courant continu.



Cette installation impliquerait deux compresseurs, l'un à basse pression, 3 atmosphères, faisant marcher l'appareil *fig.* 1 et alimentant le second compresseur par une soupape réglée à 3 atmosphères; le second faisant marcher l'appareil *fig.* 6 avec le cycle fermé déjà décrit, dans les limites de pression de 3 atmosphères à 15 atmosphères, rapport 5, dont nous avons déjà indiqué les rendements.

*Les rendements des appareils à piston liquide sont beaucoup plus élevés que ceux des machines ordinaires.*

Cette supériorité tient aux causes suivantes :

1° Deux pistons solides sont supprimés ;

2° Lorsqu'on n'utilise pas la détente, on peut fonctionner à basse pression, quelle que soit la hauteur à atteindre;

3° Lorsqu'on fonctionne à moyenne ou haute pression, on retrouve dans le retour d'air au compresseur la plus grande partie du travail de compression, avec peu d'écart entre la température de l'air comprimé et celle de l'air détendu.

Le remplacement des machines par des appareils de chaudronnerie de fabrication facile implique l'économie de construction.

Les frais d'entretien disparaissent au-delà du compresseur.

## COMMISSION DU GRISOU

# ACCIDENTS SURVENUS
PAR SUITE
# D'EXPLOSION TARDIVE
DE
# CARTOUCHES DE GRISOUNITE

### I. — RAPPORT PRÉSENTÉ A LA COMMISSION

Par M. SARRAU, Ingénieur en chef des poudres et salpêtres,
Membre de l'Institut.

Par dépêche en date du 27 février 1896, M. le Ministre des travaux publics a soumis à l'examen de la Commission du grisou, en lui demandant son avis, le dossier d'un accident survenu, le 20 décembre dernier, au puits Châtelus, n° 1, des mines de houille de Beaubrun, où un ouvrier a été légèrement blessé par l'explosion tardive d'un coup de mine chargé de grisounite.

Il résulte du procès-verbal, établi sous la forme habituelle, que cet accident s'est produit dans les circonstances suivantes.

Trois trous de mine, forés dans une même taille, avaient été chargés chacun d'une cartouche de 100 grammes de grisounite-couche (composition : azotate d'ammoniaque, 95,5; trinitronaphtaline, 4,5), amorcée avec détonateur de 1$^{gr}$,5 de fulminate. Le feu ayant été mis aux trois mèches, les trois ouvriers du chantier, qui s'étaient garés dans les environs immédiats, entendirent « trois détonations bien



distinctes, dont les deux premières presque coup sur coup et la troisième à deux ou trois secondes d'intervalle, cette dernière plus sourde que les deux autres ». Ils revinrent donc au chantier, et au moment où ils arrivaient au front de la taille, un des coups, qui fumait encore, partit et blessa l'un d'eux au visage. Il semblerait donc que ce coup fût parti en deux fois, l'explosion finale ayant été précédée d'une première explosion partielle.

Le fait est d'autant plus digne d'attention que, d'après les documents communiqués, des circonstances analogues se sont présentées antérieurement.

Le 8 septembre 1891, dans les premiers essais de la grisounite, au puits du Ban des mines de Roche-la-Molière et Firminy, un trou de mine avait été chargé de deux cartouches. Après la mise de feu, « on entendit une détonation un peu sourde », et, l'un des assistants s'étant avancé, constata que « le coup n'avait pas travaillé et que du trou sortait une fumée jaunâtre épaisse »; puis, une seconde explosion se produisit, qui le blessa légèrement.

En avril 1891, au cours d'expériences faites au puits Lachaux, de la même Compagnie, l'explosion d'un coup de mine chargé à 150 grammes avait eu lieu en deux fois et, dans un autre coup de mine chargé à 300 grammes, « on avait entendu trois détonations à un intervalle de deux ou trois secondes ».

Un autre fait, recueilli par l'un des membres de la Commission du grisou, doit aussi être signalé : il y a trois ou quatre ans, dans les exploitations de Montceau, un coup de mine ayant été allumé à l'électricité, les ouvriers, ayant entendu la détonation de la capsule, pensèrent que le coup avait raté. Au moment où ils arrivaient près du chantier, une explosion se produisit avec un retard qui était de deux ou trois minutes au moins; aucun d'eux, heureusement, ne fut blessé.

Les faits précités paraissent suffisamment établis ; pour en concevoir une explication plausible, il est utile de rappeler quelques notions relatives aux décompositions explosives.

La décomposition d'un explosif n'a pas lieu suivant une seule réaction caractéristique ; une cause importante de variation résulte de la pression sous laquelle les produits se trouvent placés pendant la réaction.

La dynamite, le coton-poudre, l'azotate d'ammoniaque pur ou mélangé, en général les explosifs azotés, fusent lentement à l'air libre, suivant un mode de décomposition caractérisé par un dégagement abondant de bioxyde d'azote.

Les mêmes matières, enflammées dans une capacité close et résistante, se décomposent rapidement sans trace de bioxyde d'azote.

Il importe, d'ailleurs, de remarquer que ce second mode, le seul qui soit véritablement explosif, se substitue fréquemment au premier dès que quelque circonstance extérieure, venant à gêner le dégagement des gaz, accroît la pression. Ainsi s'expliquent les accidents survenus en brûlant des cartouches de dynamite à l'air libre ou en cherchant à réaliser dans des tubes la combustion fusante de matières telles que le picrate d'ammoniaque.

La réaction provoquée par les détonateurs, dont l'amorce au fulminate de mercure est le type usuel, ne diffère pas de celle qui se produit par inflammation en vase clos, sous de fortes pressions. Ce qui caractérise alors le phénomène, c'est la rapidité avec laquelle la décomposition se propage sous l'influence du détonateur; cette rapidité est telle que la masse tout entière tend à se décomposer dans un volume peu différent de son volume initial, et c'est ainsi que naissent des pressions énormes, même à l'air libre ou sous bourrage léger.



Par suite de défectuosités de l'amorce ou de l'amorçage, une charge peut s'enflammer et fuser lentement au lieu de détoner ; il y a alors ce qu'on appelle un raté de détonation, et l'explosif se décompose suivant le mode caractéristique des faibles pressions, avec dégagement de bioxyde d'azote.

La faculté de détoner par l'amorce et de propager la détonation varie beaucoup avec la substance ; l'azotate d'ammoniaque est, à cet égard, particulièrement insensible, et la propriété détonante de la grisounite n'est due qu'à la présence d'une petite quantité de nitronaphtaline. On comprend donc que des circonstances peu apparentes puissent entraver la détonation de cet explosif.

Ces remarques s'appliquent aux faits signalés : à Montceau, il semble n'y avoir eu qu'un raté de détonation déterminant d'abord la décomposition fusante; l'augmentation progressive de la pression dans le trou de mine a déterminé ensuite la décomposition explosive.

Dans l'accident du 8 septembre 1891, on peut admettre que la cartouche amorcée a détoné seule d'abord, d'une façon plus ou moins complète, et qu'elle a simplement enflammé la seconde. Les détails relatés au procès-verbal donnent, d'ailleurs, à supposer que, dans ce cas, une partie de la bourre s'était interposée entre les deux cartouches. La décomposition fusante, à laquelle on peut attribuer les « fumées jaunâtres » observées, s'est ensuite transformée en réaction explosive.

On peut expliquer de la même manière les faits constatés en avril 1891, dans des trous de mine chargés soit de deux, soit de trois cartouches juxtaposées.

Quant à l'accident survenu à Beaubrun, le 20 décembre 1894, il semble plus difficile à expliquer, le trou de mine, où s'est produite la double explosion, n'ayant été chargé que d'une cartouche unique. Il faudrait admettre

qu'une irrégularité fortuite dans la contexture de la charge a suffi pour opposer à la propagation de la détonation un obstacle comparable à celui qu'un défaut de contact peut créer au point de séparation de deux cartouches.

En résumé, si l'on tient compte des avantages particuliers qui ont fait recommander l'emploi des grisounites et, en général, des dynamites à l'azotate d'ammoniaque dans les mines grisouteuses, il paraît que les accidents dus à la faible sensibilité de ces explosifs soient jusqu'à présent trop peu nombreux et trop peu importants pour qu'on puisse songer à interdire l'usage de ces matières.

Les seules mesures qui semblent utiles consistent à faire connaître aux exploitants de mines les accidents déjà relevés, les circonstances dans lesquelles il se sont produits et les raisons qui les peuvent expliquer, à insister auprès des Ingénieurs des Mines pour que tous les accidents de même nature que ceux dont il vient d'être question, et qui ont pu se produire, soient recherchés et relatés en faisant connaître avec exactitude les circonstances dans lesquelles ils se sont produits.

La réunion de ces documents donnerait, au sujet des difficultés d'emploi des grisounites et des explosifs analogues, des renseignements qu'il ne semble pas possible de demander aux expériences de la Commission des substances explosives. La probabilité de reproduire à volonté des circonstances, qui se sont présentées si rarement dans le service courant des mines, semble trop faible pour qu'on puisse avoir recours à l'expérimentation, et les faits signalés ne sont pas, d'ailleurs, en désaccord avec les principes théoriques admis jusqu'ici.

Il conviendrait enfin de signaler aux exploitants que les ouvriers chargés de mettre en œuvre les grisounites ou explosifs analogues doivent, dès qu'ils ont quelque indice d'une explosion incomplète, laisser s'écouler quelques



minutes avant de visiter le trou de mine et rester abrités pendant ce temps.

26 mars 1896.

## II. — AVIS DE LA COMMISSION DU GRISOU.

La Commission,

Après avoir entendu la lecture du rapport de M. Sarrau, et en avoir délibéré,

Considérant que les circonstances dans lesquelles se sont produits les ratés de détonation de coups de mines chargés à la grisounite-couche Favier, faisant l'objet de ce rapport, ne sont pas suffisamment élucidées pour qu'on puisse en indiquer avec précision la cause, ni formuler les mesures nécessaires pour en éviter le retour; que la probabilité de les reproduire dans les expériences de laboratoire est, d'ailleurs, infiniment trop faible pour qu'on puisse espérer en trouver une explication certaine par des recherches scientifiques directes, et que, dans ces conditions, on ne peut l'attendre que de l'étude minutieuse des anomalies semblables survenues dans la pratique;

Considérant, d'autre part, que ces accidents, d'ailleurs fort rares, se sont généralement produits dans la période d'essai de cet explosif, que leurs conséquences, peu graves, eussent été évitées en revenant moins promptement sur les coups de mines après les premières détonations; que, dès lors, il ne saurait convenir de renoncer à l'emploi de la grisounite-couche Favier pour des inconvénients encore aussi aléatoires;

Ne pouvant cependant méconnaître l'importance des indications fournies par les faits cités, et adoptant, dans leur ensemble, les conclusions du rapporteur;

Est d'avis qu'il y a simplement lieu de signaler les faits en question aux exploitants de mines, en les engageant à informer avec détails les Ingénieurs des Mines de tous les faits semblables, même non suivis d'accidents de personne, qui seraient parvenus dans le passé, ou parviendraient dans l'avenir à leur connaissance, de façon que les services locaux en fassent l'objet de rapports à M. le Ministre des travaux publics.

La Commission émet, en outre, le vœu que le rapport de M. Sarrau et le présent avis soient insérés aux *Annales des mines*.

Paris, 28 avril 1896.



# BULLETIN

## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE L'ESPAGNE EN 1894.

### 1° PRODUCTION DES CONCESSIONS.

| SUBSTANCES MINÉRALES | CONCESSIONS en activité | OUVRIERS | | | MACHINES A VAPEUR | | PRODUCTION | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Hommes | Femmes | Enfants | Nombre | Force en chevaux | Poids | Valeur sur place |
| | | | | | | | tonnes | francs |
| Fer | 411 | 11.094 | 112 | 1.524 | 72 | 1.309 | 5.352.353 | 19.979.559 |
| Fer argentifère | 11 | 156 | » | 40 | » | » | 736 | 4.130 |
| Wolfram | 1 | » | » | » | » | » | 21 | 5.351 |
| Pyrite de fer | 7 | 502 | 25 | 53 | 11 | 200 | 60.000 | 150.000 |
| Ocre | 2 | » | » | » | » | » | 120 | 1.200 |
| Plomb | 506 | 8.802 | 189 | 975 | 227 | 6.362 | 140.842 | 11.044.196 |
| Plomb argentifère | 364 | 6.954 | 167 | 1.598 | 182 | 3.652 | 181.715 | 27.486.581 |
| Argent | 8 | 277 | 2 | 71 | 7 | 325 | 7.411 | 1.189.972 |
| Cuivre | 230 | 7.636 | 159 | 918 | 103 | 4.477 | 2.445.242 | 13.194.097 |
| Cuivre et cobalt | 3 | 40 | 2 | 8 | 1 | 12 | 853 | 102.360 |
| Zinc | 110 | 1.415 | 105 | 282 | 21 | 265 | 58.760 | 1.978.953 |
| Mercure | 21 | 1.216 | 8 | 138 | 9 | 215 | 30.031 | 6.000.346 |
| Antimoine | 2 | 48 | » | 5 | 1 | 20 | 15 | 1.500 |
| Manganèse | 4 | 13 | 8 | 7 | » | » | 340 | 2.610 |
| Nickel | 1 | 13 | » | 1 | » | » | 7 | 720 |
| Cobalt | 2 | 5 | 2 | 2 | » | » | 52 | 3.120 |
| Etain | 6 | 75 | » | 15 | 1 | 4 | 26 | 13.391 |
| Pyrites arsenicales | 4 | 7 | » | 2 | » | » | 68 | 678 |
| Sel commun | 57 | 305 | 30 | 77 | 7 | 38 | 186.121 | 1.141.871 |
| Sulfate de soude | 1 | 5 | » | » | » | » | 312 | 2.340 |
| Sulfate de baryte | 6 | 12 | 1 | 2 | » | » | 541 | 13.493 |
| Terres alumineuses | 7 | 9 | 2 | 6 | » | » | 310 | 7.745 |
| Spath-fluor | 1 | 3 | » | » | » | » | 18 | 1.150 |
| Soufre | 9 | 517 | » | 175 | 1 | 10 | 10.865 | 141.241 |
| Phosphore | 1 | 3 | 1 | 1 | » | » | 40 | 400 |
| Kaolin | 7 | 58 | » | 7 | 1 | 24 | 247 | 9.478 |
| Stéatite | 7 | 34 | » | 7 | » | » | 3.109 | 68.017 |
| Topaze | 1 | 3 | » | » | » | » | kilog. 75 | 7.748 |
| Houille | 662 | 11.228 | 1.067 | 2.879 | 114 | 3.274 | 1.659.274 | 11.638.383 |
| Lignite | 69 | 402 | 28 | 132 | 6 | 32 | 48.460 | 316.331 |
| Graphite | 1 | 3 | 4 | » | » | » | 10 | 150 |
| Roches asphaltiques | 4 | 22 | » | 2 | » | » | 985 | 10.047 |
| Totaux | 2.526 | 50.854 | 1.912 | 8.927 | 764 | 20.219 | ..... | 94.517.158 |

2° PRODUCTION DES USINES.

| SUBSTANCES | PRODUCTION | | NOMBRE des usines en activité | MACHINES EN ACTIVITÉ | | | | OUVRIERS | | | MATIÈRES élaborées |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | HYDRAULIQUES | | A VAPEUR | | | | | |
| | Poids | Valeur à pied d'œuvre | | Nombre | Force en chevaux | Nombre | Force en chevaux | Hommes | Femmes | Enfants | |
| | tonnes | francs | | | | | | | | | tonnes |
| Fonte (*) | 123.798 | 8.498.411 | | | | | | | | | |
| Fer | 54.214 | 11.049.390 | 17 | 38 | 1.553 | 303 | 23.623 | 8.074 | 138 | 813 | 566.050 |
| Acier | 92.854 | 17.921.999 | | | | | | | | | |
| Fils de fer et d'acier | 3.798 | 1.177.775 | | | | | | | | | |
| Plomb | 14.532 | 263 | 12 | » | » | 30 | 721 | 1.313 | » | 83 | 104.253 |
| Plomb argentifère | 61.189 | | 26 | » | » | 27 | 301 | 954 | » | 351 | 198.440 |
| Argent fin | 88.433 | 36.928.985 | 3 | 3 | 36 | 1 | 5 | 37 | » | » | 1.591 |
| Cuivre fin | 193 | 20.977.920 | | | | | | | | | |
| Cuivre noir | 785 | 784.735 | | | | | | | | | |
| Mattes de cuivre | 29.548 | 20.683.433 | 9 | » | » | 63 | 1.741 | 3.427 | 208 | 474 | 1.345.647 |
| Zinc en lingots | 16.872 | 5.061.475 | | | | | | | | | |
| Zinc laminé | 3.032 | 1.801.380 | 1 | » | » | 13 | 134 | 437 | 7 | 28 | 13.529 |
| Calamine calcinée | 2.421 | 2.106.772 | | | | | | | | | |
| Mercure | 17.768 | 57.568 | 4 | » | » | 8 | 142 | 35 | 32 | 25 | 25.402 |
| Sulfure jaune d'arsenic | 1.610 | 6.434.807 | 7 | » | » | 4 | 49 | 330 | 5 | 219 | 29.075 |
| Sel raffiné | 184 | 66.120 | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| Sulfate de soude | 12.088 | 472.221 | 33 | » | » | » | » | 200 | 79 | 40 | 112.946 |
| Soufre fondu | 174 | 15.296 | 1 | » | » | » | » | 10 | » | » | 239 |
| Ciment hydraulique | 3.417 | 290.428 | 4 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | 5.581 |
| Agglomérés de houille | 132.645 | 1.881.018 | 29 | 20 | 424 | 25 | 307 | 351 | 26 | 59 | 285.431 |
| Coke | 209.776 | 4.261.155 | 6 | » | » | 12 | 228 | 208 | » | 29 | 197.016 |
| Asphalte | 149.906 | 3.740.138 | 3 | » | » | 4 | 16 | 65 | » | 9 | 193.495 |
| | 905 | 58.806 | 1 | » | » | 1 | 24 | 8 | » | 2 | 905 |
| Totaux | | 158.820.095 | 156 | 61 | 2.013 | 491 | 27.891 | 15.449 | 495 | 2.132 | — |

(*) Non compris 45.568 tonnes qui ont été totalement transformées en fer et en acier, et dont la valeur aurait fait double emploi avec celle de ces deux métaux.

(*Extrait de la* Stadistica minera de Espana. 1894.)



## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE ET MÉTALLURGIQUE DE L'AUTRICHE EN 1894.

| NATURE DES PRODUITS | QUANTITÉS | VALEUR SUR PLACE (*) | PRIX MOYEN |
|---|---|---|---|
| 1° *Mines* | tonnes | francs. | fr. c. |
| Houille | 9.572.952 | 81.961.249 | 8,56 |
| Lignite | 17.332.538 | 79.756.312 | 4,60 |
| Roches asphaltiques | 116 | 4.710 | 40,60 |
| Minerai de fer | 1.214.736 | 6.610.000 | 5,44 |
| — de plomb | 12.061 | 2.066.758 | 171,35 |
| — de cuivre | 7.235 | 688.757 | 95,20 |
| — de zinc | 28.491 | 1.086.257 | 38,12 |
| — d'étain | 24 | 6.089 | 253,70 |
| — d'or | 86 | 24.470 | 284,54 |
| — d'argent | 18.338 | 7.410.422 | 404,10 |
| — de mercure | 84.128 | 2.442.222 | 29,03 |
| — d'antimoine | 686 | 169.521 | 247,11 |
| — de Manganèse | 5.056 | 136.880 | 27,07 |
| — de bismuth | 570 | 37.529 | 65,84 |
| — de wolfram | 40 | 26.943 | 673,57 |
| — d'urane | 26 | 146.250 | 5.625,00 |
| — d'arsenic | 2 | 230 | 115,00 |
| — de soufre | 2.435 | 85.177 | 34,98 |
| Graphite | 24.121 | 2.178.490 | 90,31 |
| Sel | 344.319 | 60.912.467 | 176,90 |
| 2° *Usines* | | | |
| Fonte | 742.372 | 66.073.990 | 89,00 |
| Plomb | 9.628 | 3.494.067 | 362,90 |
| Cuivre | 1.341 | 1.839.587 | 1.371,80 |
| Zinc | 6.810 | 3.134.282 | 460,24 |
| Etain | 80 | 200.000 | 2.500,00 |
| Mercure | 519 | 2.610.093 | 5.029,08 |
| Antimoine | 279 | 265.132 | 950,29 |
| Or | 62 kg. | 239.044 | 3.855,55 |
| Argent | 38.246 | 7.488.129 | 195,78 |
| Bismuth | 211 | 4.997 | 23,68 |
| Urane préparé | 4.877 | 170.000 | 35,00 |

(*) Conversion : Un florin = 2 fr. 48.

(*Extrait du* Statistiches Jahrbuch des K.K. Ackerbau-Ministeriums für 1894).

## PRODUCTION DU PÉTROLE ET DE L'OZOKÉRITE EN GALICIE PENDANT L'ANNÉE 1894.

Le poids du pétrole extrait a été, en 1894, de 15.600 tonnes supérieur au chiffre réalisé en 1893, mais le prix moyen par tonne a diminué de 5f,40. Les résultats de l'exploitation ont été les suivants, pour les deux années :

| | 1893 | 1894 |
|---|---|---|
| Poids du pétrole extrait..... | 96.331 tonnes | 111.930 tonnes |
| Valeur de la production..... | 7.461.873 francs | 8.066.334 francs |
| Prix moyen par tonne..... | 77f,46 | 72f,06 |

Le nombre des entreprises en activité a été de 910, avec un personnel de 3.300 ouvriers.

On a compté d'autre part, en 1894, 137 exploitations de cire minérale en activité, sur lesquelles 5.100 ouvriers ont trouvé du travail. La production a atteint un total de 6.743 tonnes, d'une valeur de 3.898.795 francs (578f,20 par tonne), au lieu de 5.625 tonnes, d'une valeur de 3.145.470 francs (559f,20), en 1893.

(*Extrait du* Statistisches Jahrbuch des k. k. Ackerbau-Ministeriums für 1894.)



ÉCOLE NATIONALE DES MINES Entrée BIBLIOTHÈQUE bis 1 2

# SUR LES VARIATIONS

OBSERVÉES

DANS LA COMPOSITION DES APATITES, DES PHOSPHORITES ET DES PHOSPHATES SÉDIMENTAIRES.

REMARQUES

SUR

LE GISEMENT ET LE MODE DE FORMATION DE CES PHOSPHATES

Par M. Adolphe CARNOT,
Inspecteur général des Mines, membre de l'Institut.

Bien que l'on ait déjà beaucoup discuté sur la genèse des phosphates de chaux naturels, il reste encore bien des points controversés dans la théorie de leur formation.

A titre de contribution à cette théorie, je crois utile de grouper ici une série d'observations nouvelles sur les divers gisements de phosphates, sur les variations que présente leur composition, notamment au point de vue de leur teneur en fluor (*), et sur les conséquences à en tirer relativement à leur mode de formation.

Je passerai en revue successivement :

1° Les phosphates cristallisés ou apatites ;

2° Les phosphates concrétionnés ou phosphorites ;

3° Les phosphates sédimentaires.

(*) Je n'ai entrepris cette étude qu'après m'être assuré d'une méthode sûre pour la détermination du fluor dans les substances attaquables par l'acide sulfurique concentré, au nombre desquelles sont les phosphates de chaux, objet spécial de ce travail.

## I. — Apatites.

Depuis les mémorables travaux de Gustave Rose sur les apatites (1827), on admet comme une règle absolue que, dans ces minéraux cristallisés, le phosphate de chaux tribasique est toujours associé avec une proportion invariable de fluorure ou de chlorure de calcium, ces deux derniers composés étant, d'ailleurs, susceptibles de se remplacer l'un l'autre dans la proportion de leurs poids atomiques, comme l'exprime la formule :

$$P^2O^5 3CaO + \frac{1}{3} Ca\,(Fl, Cl)^2$$

ou, avec la notation unitaire :

$$Ca^5P^3O^{12}\,(Fl, Cl).$$

L'étude générale que j'entreprenais sur les phosphates de chaux m'a conduit à faire l'analyse détaillée d'une quinzaine d'échantillons d'apatites d'origines diverses, en y appliquant la méthode de dosage du fluor, que j'ai fait connaître il y a quelques années (*).

Ces analyses ont, dans la plupart des cas, vérifié très exactement la formule de G. Rose ; mais j'ai aussi rencontré quelques anomalies, qui méritent d'être signalées. Je vais en donner les résultats, en prenant pour terme de comparaison l'apatite pure, exclusivement fluorée, que je désignerai sous le nom d'*apatite normale :*

$$Ca^3P^2O^8 + \frac{1}{3} CaFl^2.$$

La proportion du fluorure de calcium y est de 7,94 p. 100;

(*) *Acad. des Sciences, C. R.*, 29 mars 1892 ; — *Annales des Mines*, 1er sem. 1893.



celle du fluor = 3,77 p. 100; le rapport du poids du fluor à celui de l'acide phosphorique $= \frac{Fl}{3P^2O^5} = 0{,}0892$. Par conséquent, pour calculer le fluor de l'apatite normale, qui aurait une teneur donnée en acide phosphorique, il suffira de multiplier cette teneur par le coefficient 0,0892.

Les échantillons examinés appartiennent : les uns, à des roches franchement éruptives, comme le trachyte de Jumilla ; d'autres, à des formations métamorphiques, comme les schistes talqueux du Tyrol ; d'autres, enfin, à de véritables filons, comme ceux de Logrosan et de Cacérès, comme ceux d'Odegarden, comme le dépôt géodique de Knappenwand ou comme les grands gîtes filoniens du Canada.

---

Je présenterai d'abord les résultats de plusieurs analyses, qui sont en concordance parfaite avec la formule théorique.

Ils s'appliquent à des types notablement différents les uns des autres : les premiers en cristaux isolés bien nets (I, II, III), les suivants en masses cristallines à grands clivages (IV, V, VI), d'autres encore en masses bacillaires ou presque fibreuses (VIII, IX).

Les trois premiers échantillons, nettement cristallisés et provenant des trois sortes de gîtes (éruptif, métamorphique et filonien), ont été empruntés à la collection de l'École des Mines.

I. — Apatite de Jumilla. La colline de Jumilla, située dans le sud-est de l'Espagne, au nord de Murcia, est constituée par une roche trachytique, à pâte rougeâtre, d'origine nettement éruptive, dans laquelle sont irrégulièrement disséminés les cristaux d'une apatite transparente et à peine colorée en jaune ou en vert.

II. — Apatite en cristaux limpides, légèrement teintés

de vert, enclavés dans des schistes talqueux métamorphiques du Tyrol.

III. — Apatite en cristaux plats, très transparents et très faiblement colorés en vert, montrant les bases du prisme dominantes avec quelques petites facettes à éclat vitreux très vif, provenant du gisement géodique de Knappenwand (Tyrol).

L'analyse a donné, pour ces trois types d'origines différentes :

| | I | II | III |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique | 41,71 | 41,91 | 41,97 |
| Fluor | 3,54 | 3,58 | 3,63 |
| Chlore | 0,47 | 0,20 | 0,03 |
| Chaux | 54,95 | 55,00 | 54,65 |
| Oxyde ferreux | traces | 0,18 | 0,48 |
| Quartz | — | — | 0,80 |
| | 100,67 | 100,87 | 101,56 |

En groupant les éléments, on trouve :

| | I | II | III |
|---|---|---|---|
| $Ca^3P^2O^8$ | 91,10 | 91,36 | 90,96 |
| $Fe^3P^2O^8$ | traces | 0,30 | 0,79 |
| $CaF^2$ | 7,27 | 7,35 | 7,41 |
| $CaCl^2$ | 0,73 | 0,31 | 0,06 |
| Quartz | — | — | 0,80 |
| | 99,10 | 99,32 | 100,02 |

On voit qu'il y a substitution d'une faible quantité d'oxyde ferreux à une proportion équivalente de chaux dans II et III et substitution d'une petite quantité de chlore au fluor dans les trois échantillons. Si l'on transforme, par calcul, le poids du chlore en un poids équivalent de fluor, on trouve, au total, dans les trois échantillons :

| | I | II | III |
|---|---|---|---|
| Fluor total | 3,79 | 3,69 | 3,65 |

D'autre part, si l'on multiplie le poids de l'acide phosphorique par le facteur 0,0892, on a le fluor de l'apatite



normale :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Fluor normal | 3,72 | 3,74 | 3,74 |

L'accord est donc à peu près parfait entre les résultats d'analyses et la formule théorique.

Les apatites d'Odegarden, district de Bamble (Norvège), se trouvent souvent en masses cristallines, largement clivables; d'autres sont presque compactes.

Les échantillons que j'ai analysés m'avaient été remis par M. Hessel, ingénieur civil des mines, qui dirige une importante exploitation de phosphates en Norvège. On sait que, dans le district de Bamble (*), l'apatite est associée à l'amphibole, souvent aussi à la biotite, à l'enstatite et à la pyrite magnétique, dans de nombreux filons, qui recoupent des roches diverses. A Odegarden, les filons traversent un gabbro, où le plagioclase a été transformé en wernérite et le pyroxène en amphibole, sur une certaine épaisseur, sous l'influence des actions filoniennes, qui ont donné naissance aux masses cristallines de phosphates de chaux.

IV. — Apatite d'Odegarden, de teinte gris verdâtre, peu transparente, en masses cristallines à grands clivages.

V et VI. — Apatites de même provenance présentant des portions teintées en vert et en jaune et possédant un éclat gras assez marqué.

| | IV | V | VI |
|---|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 41,17 | 41,01 | 41,80 |
| Fl | 1,66 | 0,85 | 2,05 |
| Cl | 3,58 | 5,31 | 2,87 |
| CaO | 53,10 | 53,44 | 53,88 |
| MgO | 0,73 | 0,17 | 0,22 |
| FeO | 0,57 | 0,20 | — |
| $Fe^2O^3$ | — | 0,53 | 0,68 |
| $SiO^2$ | — | 0,14 | 0,11 |
| | 100,81 | 101,65 | 101,61 |

(*) *Traité des gîtes métalliques*, par Fuchs et de Launay, 1893.

Le groupement des éléments dosés donne :

| | IV | V | VI |
|---|---|---|---|
| $Ca^3P^2O^8$ | 87,75 | 88,75 | 89,66 |
| $Mg^3P^2O^8$ | 1,60 | 0,37 | 0,48 |
| $Fe^3P^2O^8$ | 0,94 | 0,36 | — |
| $Fe^2P^2O^8$ | — | — | 0,96 |
| $CaFl^2$ | 3,41 | 1,74 | 4,21 |
| $CaCl^2$ | 5,60 | 8,24 | 4,49 |
| $Fe^2O^2$ | — | 0,53 | 0,20 |
| $SiO^2$ | — | 0,14 | 0,11 |
| | 99,30 | 100,13 | 100,11 |

Le calcul du fluor, effectué comme précédemment, conduit aux résultats ci-après :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Fluor dosé | 1,66 | 0,85 | 2,05 |
| Fluor correspondant au chlore | 1,91 | 2,84 | 1,54 |
| Fluor total | 3,57 | 3,69 | 3,59 |
| Fluor de l'apatite normale | 3,67 | 3,66 | 3,72 |

La concordance est donc également dans ces apatites lamelleuses aussi complète que possible entre les quantités de chlore et de fluor dosées et les quantités calculées d'après la formule de Gustave Rose.

Je citerai encore un autre échantillon d'apatite d'Odegarden, qui se rapproche des précédents par sa teinte claire d'un vert jaunâtre et par son éclat gras, mais qui en diffère par sa texture compacte et l'absence de clivages. Il en diffère aussi par sa composition, dans laquelle entrent de l'alumine en proportion assez importante et un peu de soude.



| | |
|---|---|
| Acide phosphorique | 39,50 |
| Fluor | 1,50 |
| Chlore | 3,56 |
| Chaux | 41,83 |
| Soude | 0,33 |
| Alumine | 7,75 |
| Oxyde de fer | 0,23 |
| Eau | 0,25 |
| Quartz | 4,80 |
| | 99,75 |

Ici encore, malgré la différence de composition chimique et de caractères physiques, on retrouve des proportions normales d'acide phosphorique et de fluor ou de chlore; car le fluor dosé = 1,50; le fluor correspondant au chlore = 1,90; par conséquent, le fluor total = 3,40, et le fluor de l'apatite normale = 3,52.

Les gites de phosphates de l'Estramadure (Espagne) ont été reconnus comme étant d'origine hydrothermale. Ils consistent en filons, qui traversent tantôt le granite, tantôt les schistes et tantôt les calcaires, avec une allure particulière dans chacune de ces roches : nettement délimités et presque verticaux dans le granite, comme à Zarzola Major; divisés en plusieurs veines plus ou moins confuses dans les schistes cambriens, comme à Logrosan; épanouis en forme de grands amas dans le calcaire dévonien, comme à Cacérès.

Le minerai est en masses cristallines, caractérisées par une texture fibreuse très prononcée, et, en même temps, par une disposition zonée, qui atteste des venues successives de liquides, laissant déposer les matières dissoutes. Le phosphate est souvent accompagné de quartz et parfois aussi de spath-fluor.

L'analyse de deux échantillons, l'un de Logrosan (VIII), l'autre de Cacérès (IX), a montré qu'ils renfermaient les proportions ci-après d'acide phosphorique et de fluor,

avec de simples traces de chlore :

| | VIII | IX |
|---|---|---|
| Acide phosphorique | 36,12 | 39,58 |
| Fluor dosé | 3,16 | 3,45 |
| Fluor calculé pour l'apatite normale | 3,22 | 3,52 |

Le fluor et l'acide phosphorique présentent donc dans ces apatites fibreuses les mêmes proportions que dans l'apatite normale.

En résumé, on voit que, dans tous les gites précédents, les apatites offrent, malgré leurs différences d'aspect, une remarquable uniformité de composition, toutefois avec substitutions plus ou moins importantes entre les éléments isomorphes : d'une part, entre le fluor et le chlore ; de l'autre, entre la chaux et diverses bases, qui sont, en général, des protoxydes, comme la magnésie ou l'oxyde ferreux, mais parfois aussi de l'alumine et de l'oxyde ferrique.

---

Les phosphates cristallisés du Canada donnent un premier exemple de dérogation à cette règle.

Ces phosphates, exploités dans les provinces de Québec et d'Ontario, forment de grandes lentilles au milieu de pyroxénites associées à des cipolins. On a signalé dans ces gites la présence de wernérite, de calcite, de fluorine, de quartz, etc. Les phosphates eux-mêmes sont tantôt en masses cristallines, tantôt sous forme de sable cristallin ou à l'état de prismes hexagonaux, qui atteignent parfois de grandes dimensions. Leurs couleurs habituelles sont le vert émeraude et le rouge.

J'ai soumis à l'analyse deux échantillons de ces apatites, qui étaient accompagnées de cristaux de calcite, et qui faisaient eux-mêmes effervescence aux acides, bien que l'on n'y aperçût pas de calcite.

Tous les deux étaient cristallisés en prismes hexagonaux : le premier (X), de Renfrew, était d'un brun rouge, avait près d'un décimètre de longueur et un centimètre de diamètre ; le second, de Templeton, était vert foncé et avait de 6 à 8 centimètres de diamètre.



J'ai profité des grandes dimensions de ce cristal pour en examiner séparément la portion interne (XI) et la portion externe (XII), dans le but de constater si elles n'avaient pas éprouvé, à des degrés différents, quelque modification sous l'influence des eaux qui avaient déposé la calcite ; mais l'analyse a montré que la composition était identique au centre et à la surface du cristal ; en voici les résultats :

| | X | XI | XII |
|---|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 41,00 | 41,50 | 41,64 |
| Fl | 2,26 | 1,26 | 1,17 |
| Cl | 0,28 | 0,37 | 0,42 |
| $CO^2$ | 1,50 | 2,30 | 2,31 |
| CaO | 50,84 | 52,90 | 52,90 |
| MgO | traces | traces | traces |
| FeO | — | 1,30 | 1,20 |
| $Fe^2O^3$ | 4,59 | 0,22 | 0,30 |
| $SiO^2$ | 0,55 | 0,30 | 0,37 |
| | 101,00 | 100,15 | 100,31 |

En groupant les éléments, on a :

| | | | |
|---|---|---|---|
| $Ca^3P^2O^8$ | 83,78 | 88,30 | 88,53 |
| $Fe^3P^2O^8$ | — | 2,15 | 2,02 |
| $Fe^2P^2O^8$ | 5,60 | 0,44 | 0,57 |
| $CaFl^2$ | 4,60 | 2,59 | 2,49 |
| $CaCl^2$ | 0,44 | 0,52 | 0,67 |
| $CaCO^3$ | 3,41 | 5,23 | 5,25 |
| $Fe^2O^3$ | 1,62 | — | — |
| $SiO^2$ | 0,55 | 0,30 | 0,37 |
| | 100,00 | 99,53 | 99,81 |

Les proportions de fluor et de chlore contenues dans

ces échantillons sont beaucoup moindres que dans les apatites ordinaires.

On trouve, en effet, par l'analyse :

| | X | XI | XII |
|---|---|---|---|
| Fluor dosé | 2,24 | 1,26 | 1,17 |
| Fluor correspondant au chlore | 0,15 | 0,20 | 0,22 |
| Fluor total | 2,39 | 1,46 | 1,39 |

tandis que le calcul donnerait, pour les apatites normales d'égale teneur en acide phosphorique :

3,66 3,70 3,71

Mais, ayant remarqué que les acides donnaient lieu à une effervescence vive (*) et que le carbonate de chaux était uniformément distribué dans la masse de l'apatite, je supposai que le carbonate avait pu prendre la place d'une quantité équivalente de fluorure ou de chlorure de calcium.

Si l'on calcule, en effet, la proportion de fluor correspondant à l'acide carbonique dosé, on trouve, pour les trois échantillons :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Fluor correspondant à $CO^2$ | 1,30 | 1,99 | 2,00 |

et, en ajoutant ces quantités à celles précédemment calculées, on a :

3,69 3,45 3,39.

(*) En recueillant le gaz dégagé par l'action d'un acide sur une apatite du Canada, j'ai observé qu'il n'était pas entièrement absorbable par la potasse; en outre de l'acide carbonique, il renfermait de l'oxygène et de l'azote à peu près en mêmes proportions qu'ils existent dans l'air atmosphérique. Cette observation que j'avais consignée avant de connaître les curieuses expériences de M. Georges Friedel sur l'absorption des gaz (et notamment de l'air) par les zéolithes chauffées, puis refroidies, me semble pouvoir en être rapprochée. Je dois faire observer que d'autres apatites, traitées de même, n'ont donné aucun dégagement gazeux.



On retrouve ainsi presque exactement les nombres que le calcul avait donnés pour le fluor de l'apatite normale.

Pareille conclusion se dégage de l'examen d'un autre échantillon d'apatite (XIII), qui figure dans la collection de l'École des Mines comme venant de London-Grove (Pensylvanie). Cet échantillon a la forme d'un grand prisme hexagonal de couleur verte assez sombre. L'analyse conduit à la composition suivante :

| | | | |
|---|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 41,55 | $Ca^3P^2O^8$ | 89,74 |
| Fl | 1,95 | $Fe^3P^2O^8$ | 1,14 |
| Cl | 0,94 | $CaFl^2$ | 4,00 |
| $CO^2$ | 1,42 | $CaCl^2$ | 1,57 |
| CaO | 53,97 | $CaCO^3$ | 3,22 |
| MgO | traces | $Fe^2O^3$ | 0,04 |
| FeO | 0,73 | $SiO^2$ | 0,25 |
| $SiO^2$ | 0,25 | | 99,96 |
| | 100,81 | | |

On en déduit :

| | XIII |
|---|---|
| Fluor dosé | 1,95 |
| Fluor correspondant à Cl | 0,50 |
| Fluor correspondant à $CO^2$ | 1,23 |
| Total | 3,68 |
| Fluor de l'apatite normale | 3,71 |

Ici la concordance est parfaite; il semble vraiment que le carbonate de calcium se soit substitué, molécule à molécule, à du fluorure ou à du chlorure de calcium, en sorte que la composition serait représentée par la formule :

$$(Ca^3, Fe^3)\ P^2O^8 + Ca\ (Fl^2, Cl^2, CO^3).$$

J'ai pensé que cette substitution pouvait être attribuée aux phénomènes qui ont déterminé le dépôt de calcite dans les filons d'apatite, et j'ai cherché à produire artificiellement une modification analogue par une opération de

laboratoire. A cet effet, j'ai soumis de l'apatite en poudre à l'action d'une solution de carbonate de soude dans des tubes en verre épais, fermés à la lampe et chauffés pendant six jours à la température de 160°. L'expérience a été faite séparément sur l'apatite exclusivement fluorée de Knappenwand (III) et sur l'apatite chlorée d'Odegarden (V). La poudre restée insoluble a été ensuite lavée avec soin et analysée. On a trouvé :

| | III *bis* | V *bis* |
|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 41,78 | 40,90 |
| Fl | 3,60 | 0,80 |
| Cl | traces | 4,60 |
| $CO^2$ | 0,11 | 0,48 |
| CaO | 54,60 | 53,45 |
| MgO | — | 0,20 |
| FeO | 0,36 | 0,05 |
| $Fe^2O^3$ | — | 0,67 |
| $SiO^2$ | 0,72 | 0,11 |
| | 101,17 | 101,26 |

ou, après groupement des éléments :

| | III *bis* | V *bis* |
|---|---|---|
| $Ca^3P^2O^8$ | 90,70 | 88,65 |
| $Mg^3P^2O^8$ | — | 0,44 |
| $Fe^3P^2O^8$ | 0,60 | 0,12 |
| $CaFl^2$ | 7,39 | 1,64 |
| $CaCl^2$ | — | 7,19 |
| $CaCO^3$ | 0,25 | 1,10 |
| $Fe^2O^3$ | — | 0,67 |
| $SiO^2$ | 0,80 | 0,11 |
| | 99,66 | 99,92 |

Si l'on compare ces résultats à ceux qui ont été trouvés plus haut sur les mêmes minéraux dans leur état primitif, on voit que l'action du carbonate de soude, presque nulle sur l'apatite fluorée de Knappenwand, a été, au contraire, assez marquée sur l'apatite chlorée d'Odegarden : 1/7 du



chlore a disparu. Le calcul, fait comme précédemment, donne, pour l'apatite V *bis*, après l'action du carbonate alcalin :

| | |
|---|---|
| Fluor dosé | 0,80 |
| Fluor correspondant à Cl | 2,46 |
| Fluor correspondant à $CO^2$ | 0,41 |
| | 3,67 |
| Fluor de l'apatite normale | 3,65 |

Par conséquent, il s'est produit une substitution analogue à celle qui avait attiré mon attention dans les apatites du Canada ; mais je suis porté à croire que, dans celles-ci, la substitution s'est produite, non pas après coup, mais plutôt à l'époque même où les eaux thermo-minérales déposaient l'apatite et la calcite, que l'on trouve associées dans les gîtes de phosphates du Canada.

---

Une autre anomalie, dont l'explication paraît plus difficile, s'est rencontrée dans l'examen d'apatites provenant du mont Greiner et de Golling (Tyrol) (collection de l'École des Mines).

Ces apatites, d'un jaune clair, sont enclavées dans un talc schisteux grisâtre, qui perd 4,7 p. 100 d'eau par calcination prolongée. Elles diffèrent essentiellement des autres apatites par leur forme extérieure, car elles ne portent aucune face cristalline.

L'une d'elles offre la forme d'un cône allongé, de $0^m,10$ de longueur, émoussé à la pointe et un peu recourbé, comme une dent de morse; l'autre est presque cylindrique, avec extrémité arrondie. Mais elles présentent des clivages et particulièrement un clivage facile et brillant parallèlement à la base. L'examen de lames de clivage au microscope polarisant n'a révélé absolument aucune différence avec les apatites ordinaires, fait im-

portant que je n'ai voulu énoncer qu'après l'avoir soumis au contrôle de M. Termier, dont on connaît la très grande compétence en pareille matière.

L'analyse montre, dans ces apatites sans forme cristalline extérieure, une curieuse particularité : c'est qu'elles ne renferment qu'une quantité tout à fait insignifiante de fluor et de chlore, quantité absolument insuffisante pour répondre à la formule générale.

Deux analyses faites sur des échantillons d'aspect analogue, mais d'origine distincte (mont Greiner et Golling), ont donné :

| | XIV | XV |
|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 42,98 | 44,06 |
| Fl | 0,23 | 0,38 |
| Cl | 0,12 | 0,17 |
| CaO | 53,18 | 53,50 |
| MgO | tr. | tr. |
| FeO | 0,58 | 0,70 |
| $SiO^2$ | 2,60 | 1,40 |
| Perte au feu | 0,35 | 0,42 |
| | 100,04 | 100,63 |

En supposant (ce qui n'est pas bien certain) que la perte au feu soit due à de l'eau combinée plutôt qu'à un dégagement de fluorure de silicium, la composition peut s'écrire :

| | XIV | XV |
|---|---|---|
| $Ca^3P^2O^8$ | 93,83 | 96,19 |
| $CaFl^2$ | 0,47 | 0,78 |
| $CaCl^2$ | 0,19 | 0,27 |
| CaO | 1,85 | 0,67 |
| FeO | 0,58 | 0,70 |
| $SiO^2$ | 2,60 | 1,40 |
| $H^2O$ | 0,35 | 0,42 |
| | 99,90 | 100,43 |

Si l'on calcule, comme plus haut, le fluor total de ces deux échantillons et le fluor des apatites normales correspondantes, on arrive aux résultats suivants :



| | XIV | XV |
|---|---|---|
| Fluor total (équivalent à Fl et Cl) | 0,29 | 0,46 |
| Fluor de l'apatite normale | 3,83 | 3,92 |

La quantité existante atteint donc à peine le dixième de celle que comporterait la formule générale des apatites.

Or, il n'y a pas de carbonate de chaux dans ces apatites, mais seulement un peu de chaux en excès et un peu d'oxyde ferreux et de silice. Un quart environ de la silice isolée par les acides est soluble dans la potasse et peut être supposée en combinaison avec l'oxyde ferreux.

Il reste une petite proportion de chaux non saturée par l'acide phosphorique, tandis que, dans tous les cas précédents, le groupement des éléments dosés conduisait exactement à la composition du phosphate tribasique.

Mais peut-on attribuer quelque influence à une aussi faible proportion de chaux hydratée ou silicatée dans la cristallisation du phosphate de chaux? Ne doit-on pas plutôt admettre que le phosphate tribasique possède, par lui-même, un réseau cristallin semblable à celui de l'apatite?

Quoi qu'il en soit, il est fort remarquable que le seul exemple que l'on ait encore rencontré d'un phosphate tribasique de chaux, dépourvu de la quantité normale de fluorure, de chlorure ou de carbonate de calcium, soit en même temps dépourvu de toute forme cristalline extérieure, bien qu'il présente les clivages et les propriétés optiques d'une véritable apatite.

Au cours de l'impression de cette note, M. Lacroix m'a fait voir, dans la collection minéralogique du Muséum, un échantillon provenant du gisement du mont Greiner et présentant la forme d'un gros prisme hexagonal basé, mais, sous tous les autres rapports, semblable aux échantillons de l'École des Mines.

Cette variété presque dépourvue de fluor, comme je

m'en suis assuré de nouveau, peut donc avoir non seulement la structure et les propriétés optiques de la véritable apatite, mais aussi sa forme extérieure en prisme hexagonal (ou pseudo-hexagonal, d'après Mallard).

## II. — Phosphorites.

Ces phosphates sont particulièrement caractérisés par leur structure concrétionnée. On y reconnait aisément l'existence de couches superposées, s'enveloppant les unes les autres et présentant à l'œil une disposition zonée avec des surfaces arrondies et souvent mamelonnées. La texture est tantôt compacte en apparence, tantôt visiblement fibreuse. La couleur est parfois uniforme, blanche ou d'un blanc jaunâtre; mais souvent les zones successives présentent des teintes différentes, extrêmement tranchées, que l'on a pu comparer à celles des agates, alternativement blanches et brunes, ou bien jaunes et rouges, grises et bleues, etc.

La superposition de ces zones, qui apparait souvent avec une grande netteté, indique clairement le mode de dépôt des phosphorites. On est naturellement conduit à le rapprocher de celui des calcaires concrétionnés, des stalactites par exemple, c'est-à-dire à l'attribuer à une dissolution de la matière phosphatée dans des eaux probablement chargées d'acide carbonique; ces eaux, en perdant le gaz et se concentrant, sans doute, le long des surfaces qu'elles humectaient, y ont déposé, par intermittence, à l'état de croûtes minces, les sels qu'elles tenaient en dissolution.

Mes observations ont porté sur des échantillons de provenances très variées : les uns tirés des gisements célèbres du Quercy (Aveyron, Lot, Tarn-et-Garonne), où la disposition zonée, sur laquelle je viens d'insister, est



particulièrement accusée; d'autres des gîtes du Gard, de l'Hérault, de l'Aude et enfin de l'Oranais.

Je ne donnerai pas, en général, l'analyse complète de ces phosphorites, comme je l'ai fait pour les apatites, parce qu'elles renferment presque toujours des mélanges du phosphate, soit avec du carbonate de chaux, soit avec de l'oxyde de fer ou de manganèse, soit avec de la silice ou encore avec de la matière organique. Ces mélanges accidentels enlèvent presque tout intérêt à l'analyse complète des phosphates non cristallisés. Mais, afin de pouvoir continuer l'étude comparative que j'ai commencée sur les apatites, je ferai connaître, dans tous les cas, la teneur en acide phosphorique ($P^2O^5$) et la teneur en fluor ($fl$) de la matière analysée. J'inscrirai ensuite la teneur en fluor (Fl) d'une apatite normale, correspondant à une égale proportion d'acide phosphorique. Enfin, je ferai connaître le rapport de la teneur réelle à la teneur calculée de l'apatite normale $\left(\frac{fl}{Fl}\right)$.

### Phosphorites du Quercy (Aveyron, Lot, Tarn-et-Garonne).

Les nombres suivants se rapportent à cinq échantillons d'origine et d'aspect variés, montrant nettement le caractère de concrétions avec surfaces mamelonnées, parfois écailleuses, et avec zones successives de teintes diverses.

XVI. — Villeneuve (Aveyron) : concrétions à zones blanches et d'un noir bleuâtre, cassure conchoïdale un peu vitreuse : traces d'iode révélées par l'analyse.

XVII. — Druilhac, près Larnagol (Lot): concrétions à zones gris bleu foncé et gris clair, cassure un peu conchoïdale; traces d'iode.

XVIII. — Cahors (Lot) : concrétions à cassure grise, surfaces mamelonnées bleuâtres, ferrugineuses.

XIX. — Concols (Lot) : concrétions à zones brunes et blanches.

XX. — Caylus (Tarn-et-Garonne) : concrétions à surfaces mamelonnées brunes ou noires, à zones alternativement grises et blanches.

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| XVI. — Villeneuve | 34,70 | 1,09 | 3,10 | 0,35 |
| XVII. — Druilhac | 36,17 | 1,38 | 3,23 | 0,43 |
| XVIII. — Cahors | 34,66 | 0,40 | 3,09 | 0,13 |
| XIX. — Concols | 26,00 | 0,18 | 2,32 | 0,08 |
| XX. — Caylus | 29,55 | 0,11 | 2,64 | 0,04 |

Voici les résultats de l'analyse complète de deux échantillons de phosphorite des environs de Bozouls (Aveyron) et la composition calculée qui en résulte :

| | XXI | XXII |
|---|---|---|
| Acide phosphorique | 16,04 | 18,08 |
| Acide carbonique | 18,66 | 17,10 |
| Fluor, chlore | traces | traces |
| Chaux | 42,67 | 43,01 |
| Magnésie | traces | traces |
| Alumine, peroxyde de fer | 6,45 | 6,03 |
| Insoluble | 7,40 | 7,33 |
| Perte à 130° | 2,14 | 1,93 |
| Perte au-dessus de 130° | 6,69 | 6,41 |
| | 100,05 | 99,89 |
| $Ca^3P^2O^8$ | 34,90 | 39,22 |
| $Al^2P^2O^8$ | 0,12 | 0,22 |
| $CaCO^3$ | 42,41 | 38,86 |
| $Fe^2O^3$ | 6,39 | 5,92 |
| Insoluble | 7,40 | 7,33 |
| Eau et matières organiques | 8,83 | 8,34 |
| | 10,005 | 99,89 |

La teneur en fluor des phosphorites du Quercy est, comme on le voit, toujours très inférieure à celle des apatites et souvent presque nulle. On doit remarquer, en outre, qu'elle est extrêmement variable d'un gite à un autre. Nous aurons à revenir sur ces deux points.



On sait que les phosphates du Quercy remplissent les crevasses du calcaire oxfordien, crevasses qui sont parfois restées de simples fentes, ouvertes dans le calcaire suivant des alignements presque rectangulaires (Daubrée, Trutat), et qui, d'autres fois, s'élargissent en forme de vastes entonnoirs. Ces crevasses ou poches peuvent avoir des profondeurs de 40, 60 et même jusqu'au-delà de 100 mètres ; mais elles sont toujours fermées ou, du moins, s'amincissent à tel point vers le bas qu'elles deviennent inexploitables. Le phosphate est séparé du calcaire par une masse ordinairement jaune ou rouge, argilo-calcaire, qu'on désigne sous le nom de terre phosphatée. Enfin, il convient de rappeler que l'on a trouvé de nombreux ossements d'animaux terrestres dans les phosphorites ou dans les terres phosphatées et que l'on a pu, grâce à ces découvertes, fixer l'époque du remplissage des poches, comme ayant coïncidé avec l'existence des animaux en question. Les études paléontologiques faites sur cette faune exclusivement terrestre ont conduit à placer le phénomène de la formation des poches du Quercy au début de la période oligocène, à peu près à l'âge du calcaire de Brie dans le bassin parisien (MM. Gervais, Gaudry, Filhol, Douvillé).

La formation des gites phosphatés du Quercy a donné lieu à deux hypothèses différentes, celle d'une origine filonienne et celle d'une origine superficielle. Ces hypothèses ont été discutées avec un grand talent par le professeur Dieulafait dans son important mémoire sur l'*Origine des phosphates de chaux en amas*, mémoire auquel je ne saurais mieux faire que de renvoyer le lecteur (*).

(*) *Annales de Chimie et de Physique*, 1885, 6e série, t. V, p. 204-240.

Suivant la première, le phosphate de chaux aurait été déposé par des sources thermales venues de la profondeur et remplissant les crevasses ouvertes dans le terrain jurassique, comme cela s'est produit dans les fentes du granite, des schistes et des calcaires dévoniens pour les gites de l'Estramadure.

Mais il est difficile d'admettre une assimilation entre ces deux sortes de gites, si l'on se reporte aux observations faites plus haut sur la teneur en fluor, à la fois très faible et très variable, des phosphorites du Quercy, et si on la compare à la teneur toujours élevée et absolument régulière pour un même gite, non seulement des apatites cristallisées, mais aussi des apatites fibreuses et concrétionnées, comme celles d'Espagne qui ont le plus d'analogie d'aspect avec les phosphorites proprement dites.

On a, d'ailleurs, fait valoir aussi contre l'hypothèse de l'origine hydrothermale, la disposition des gîtes du Quercy en poches ou entonnoirs qui semblent fermés vers le bas. On a signalé dans le même sens la présence de galets tombés de la surface et indiquant que les fentes étaient restées béantes à l'époque du dépôt des phosphates.

On doit enfin tenir compte de l'observation importante consignée par Dieulafait dans les termes suivants : « Les phosphorites sont toujours incrustées sur le *sol* des galeries et des poches, jamais au *plafond* » (*). M. H. Lasne a, de même, remarqué dans un gîte de phosphorites en Andalousie que le minerai s'est déposé en stalagmites, exclusivement au *mur* des filons où on l'exploite, tandis qu'à la paroi opposée, c'est-à-dire au *toit* de ces mêmes fentes inclinées, s'observent uniquement des stalactites calcaires (**).

La seconde hypothèse attribue le dépôt des phosphorites à l'action des eaux de surface. Ces eaux se seraient chargées d'acide carbonique et, en même temps, de phosphate de chaux au contact des matières végétales et animales en décomposition; filtrant ensuite à travers un sol plus ou moins perméable et léchant les parois rocheuses des fentes ouvertes dans le calcaire jurassique, elles les auraient peu à peu corrodées, en laissant insolubles les parties argileuses et ferrugineuses du calcaire, elles auraient ainsi abandonné peu à peu les concrétions phosphatées sous l'influence de phénomènes souvent répétés de concentration et d'évaporation. Il n'y aurait alors rien que de naturel dans la présence d'ossements et de galets entraînés pendant cette longue période de temps vers des crevasses encore béantes.

(*) *Comptes Rendus*, t. XCVIII, p. 843.
(**) Communication verbale.



On pourrait attribuer la présence du fluorure en quantité faible et variable dans les phosphorites, soit à la dissolution de phosphates primitivement sans fluor ou fluorés d'une manière inégale, soit à la fixation sur le phosphate en voie de dépôt de traces de fluorure empruntées aux terrains traversés par les eaux d'infiltration.

Ainsi les différentes circonstances observées dans les gîtes du Quercy trouvent une explication plausible dans la théorie du dépôt des phosphorites par les eaux venues de la surface et non pas venues de la profondeur, comme celles qui ont produit les gites filoniens véritables.

Nous allons voir que la même théorie s'applique sans difficulté à d'autres gîtes, notamment à ceux des phosphorites du Gard, de l'Hérault, de l'Oranais, etc.

### Phosphorites du Gard.

Il existe dans le Gard, comme dans le Lot, le Tarn-et-Garonne et l'Aveyron, des gites de phosphates concrétionnés remplissant des crevasses ou des poches au milieu de

roches calcaires. Mais ces roches ne sont pas toujours du même âge et les phosphorites elles-mêmes paraissent s'être déposées à des époques diverses.

A Quissac, les excavations sont ouvertes dans le calcaire oxfordien et l'âge du dépôt paraît être contemporain de celui du Quercy.

A Tavel, à Lirac, à Saint-Maximin (arrondissement d'Uzès), les poches se trouvent dans un calcaire compact, que l'on rapporte à l'étage urgonien ou au néocomien supérieur. Mais ici encore, les ossements de Palœotherium et d'Anoplotherium, qu'on y a rencontrés, assignent à la formation phosphatée le même âge qu'à celles de Quissac et du Quercy.

Les gîtes récemment mis en exploitation sur le plateau d'Uzès, en face d'Avignon, notamment celui de la Capelle, étudié par M. Nicolas et M. Depéret, présentent une faune différente, que ces savants rapportent au commencement de l'ère quaternaire (*).

Les échantillons, que j'ai eus entre les mains, des phosphorites de Quissac (XXIII) présentent une texture concrétionnée très nette, avec zones d'accroissement brunes et jaunes et surfaces très mamelonnées.

Je dois à l'obligeance de M. Depéret quelques échantillons des phosphates de la Capelle ; leur couleur est blanc jaunâtre ; leur texture un peu grenue et caverneuse (XXIV à XXVI).

L'essai a donné :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| XXIII..... | 33,10 | 0,05 | 2,95 | 0,02 |
| XXIV..... | 35,64 | 1,89 | 3,18 | 0,59 |
| XXV..... | 34,00 | 1,20 | 3,03 | 0,40 |
| XXVI..... | 36,26 | 1,37 | 3,23 | 0,42 |

La teneur en fluor de la phosphorite concrétionnée de

(*) *Comptes Rendus*, 14 janvier 1895.



Quissac est donc presque nulle; celle des phosphorites grenues de la Capelle est beaucoup plus élevée; il faut probablement l'attribuer à la nature des terrains traversés par les eaux qui ont donné naissance aux dépôts phosphatés. Peut-être ces terrains renferment-ils des phosphates sédimentaires, comme il en existe à peu de distance, soit dans les couches néocomiennes, soit dans les grès verts et le gault (*).

Je puis citer, au contraire, comme absolument exempt de fluor, un échantillon de phosphorite compacte, d'un blanc jaunâtre, envoyé par M. Blanc, pharmacien à Remoulins (Gard), qui l'avait recueilli au pied d'une grotte naturelle située près du Pont-du-Gard, dans l'arrondissement d'Uzès. D'après les observations de M. Blanc, ce phosphate compact paraît provenir d'un dépôt formé par des eaux filtrant doucement à travers le sol de la grotte; or M. Cazalis de Fondouce a trouvé dans cette grotte une terre rougeâtre avec beaucoup de débris d'ossements et divers objets attestant que la grotte a été habitée par l'homme. L'examen de cette phosphorite a donné :

| | $P^2O^5$ | $fl$ |
|---|---|---|
| XXVII..... | 27,85 | néant |

Le fait de l'absence de fluor concorde bien avec l'hypothèse d'un dépôt par des eaux ayant filtré au contact d'os assez récents et non fluorés.

### Phosphates de l'Hérault.

Le département de l'Hérault possède quelques gîtes phosphatés. Je citerai, entre autres, celui de la *Montagne de Cette*, situé à peu de distance de cette ville. Un échantillon (XXVIII), déposé par Ed. Fuchs dans la collection

(*) Paul de Gasparin, *Comptes Rendus*, 17 novembre 1884.

des gîtes minéraux de l'École des Mines, montre la phosphorite adhérente à un calcaire compact de l'étage oxfordien, dans lequel le gîte se trouve encaissé. L'analyse a donné :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique ..... | 32,28 | $Ca^3P^2O^8$..... | 69,79 |
| Fluor, chlore..... | traces | $CaCO^3$ ..... | 21,86 |
| Acide carbonique ..... | 9,62 | $(Al,Fe)^2P^2O^8$.... | 0,64 |
| Chaux..... | 50,07 | $Fe^2O^3$..... | 0,53 |
| Oxyde de fer et alumine. | 0,85 | Insoluble ..... | 0,51 |
| Insoluble..... | 0,51 | Eau et mat. org. | 6,76 |
| Perte à 130° ..... | 0,98 | | 100,09 |
| Perte au-dessus de 130°.. | 5,78 | | |
| | 100,09 | | |

**Phosphates de l'Oranais (Algérie).**

On a découvert, dans le département d'Oran, une série de grottes à phosphates, dont plusieurs ont pu donner lieu à une exploitation industrielle de quelque importance.

Je citerai celles du Djebel Toumaï, du Djebel Tadjera, de Tlemcen et de la vallée du Cheliff.

1. — M. Flamand, chargé de conférences à l'École supérieure des Sciences d'Alger, a bien voulu, en m'envoyant des échantillons du Djebel Toumaï, me fournir quelques explications sur ce gîte, situé près de Nédromah, entre Nemours et Lalla-Marnia, vers l'ouest de l'Oranais.

Il est constitué par des filons-poches, ouverts dans des calcaires compacts, qui appartiennent aux terrains liasiques (lias moyen ou inférieur). On les a exploités en 1888 et on y a trouvé des phosphates concrétionnés proprement dits, avec teneurs de 30 à 38 d'acide phosphorique, et des brèches phosphatées à la teneur moyenne de 20 p. 100.

Les brèches se rencontrent toujours à la partie supérieure des poches, formant au-dessus du phosphate concré-



tionné une sorte de couverture ou de *carapace*, nom qui leur est assez couramment donné par les géologues et par les exploitants ; elles sont formées de débris de calcaire liasique entremêlés avec des fragments de phosphorite et cimentés par une terre argileuse rougeâtre, un peu phosphatée. Ces brèches paraissent être le produit du remaniement par les eaux météoriques de phosphates antérieurement déposés.

On y trouve nettement incluses des coquilles nombreuses d'*Helix aspersa*, *Helix lactea*, etc. ; mais ces fossiles ne peuvent servir à déterminer que l'âge de la brèche, qui est quaternaire, et non celui des phosphorites elles-mêmes, lequel est encore discuté (quaternaire ou pliocène).

Les phosphates concrétionnés présentent des aspects variés : tantôt blancs à veines grises (XXIX-XXXI), tantôt à veines brunes et rosées (XXXII), tantôt d'un brun marron (XXXIII) ou à portions jaunes et noires (XXXIV). Des zones manganésifères s'observent souvent en profondeur au contact des calcaires encaissants. Les échantillons XXXV et XXXVI sont des fragments, l'un marron, l'autre rougeâtre, de la brèche avec Helix de Djebel Toumaï.

| | | $P^2O^5$ | fl |
|---|---|---|---|
| Djebel Toumaï | XXIX..... | 37,48 | 0,10 |
| Phosphorites | XXX ..... | 36,90 | tr. |
| | XXXI..... | 36,20 | tr. |
| | XXXII ..... | 29.93 | 0,06 |
| | XXXIII ..... | 33,71 | 0,08 |
| | XXXIV ..... | 34,73 | tr. |
| Brèche-carapace | XXXV ..... | 29,10 | tr. |
| | XXXVI ..... | 20,47 | tr. |

2. — Les échantillons XXXVII et XXXVIII appartiennent à une brèche osseuse du Djebel Tadjera (Traras), que M. Pomel a étudiée et déterminée comme étant d'âge

quaternaire; elle forme un amas phosphaté en forme de poche dans les terrains jurassiques.

| | | $P^2O^5$ | $fl$ |
|---|---|---|---|
| Phosphorite ferrugineuse..... | XXXVII | 18,22 | tr. |
| Brèche à ossements ..... | XXXVIII | 4,75 | néant |

On voit que ces phosphorites sont presque absolument dépourvues de fluor. La plus haute teneur observée ne dépasse pas $\frac{1}{375}$ de la teneur en acide phosphorique. On y a, d'ailleurs, constaté la complète absence de chlore, mais on y trouve un peu d'alumine et d'oxyde de fer.

3. — On a, depuis quelques années, exploré et mis en exploitation de nombreuses grottes à phosphates dans l'arrondissement de Tlemcen et spécialement dans la vallée du Cheliff, où elles se montrent disséminées sur 30 ou 40 kilomètres d'étendue, à l'ouest d'Orléansville.

D'après les renseignements que je dois à M. Bourbon, ingénieur civil des mines, ces grottes sont ordinairement signalées à la surface par de petits mamelons, dont elles occupent à peu près $\frac{1}{8}$ de la surface. Elles sont généralement allongées, évasées par le bas et reliées à la surface par des fissures du terrain encaissant.

Ce terrain est du calcaire à *Lithothamnium* ou à Mélobésies, qui représente le miocène moyen (helvétien) et parfois aussi le miocène supérieur (sahélien).

Le phosphate remplit le fond des grottes, à la façon des stalagmites, et l'on peut compter, en général, sur 12 tonnes de minerai par mètre carré de surface stalagmitique. Le phosphate concrétionné du fond des grottes est à 70 ou 80 p. 100 de phosphate tribasique ; le phosphate terreux supérieur varie de 30 à 40 p. 100 et ne peut être employé que sur place.

L'analyse a porté sur des phosphorites exploitées dans



les grottes de Retaïmia (XXXIX), d'Inkermann (XL) et de Djorf el Amar, commune de Nedrama (XLI) ; les échantillons étaient demi-opalins à cassure conchoïdale, veinés de jaune et de jaune vert :

| | $P^2O^5$ | $fl$ |
|---|---|---|
| XXXIX..... | 40,66 | 0,08 |
| XL..... | 38,59 | 0,05 |
| XLI..... | 32,45 | 0,11 |

Le remplissage des grottes à phosphates de l'Oranais doit être rapporté, sans hésitation, à l'apport de matériaux du dehors par des eaux de surface. L'absence presque complète de fluor ne peut guère se concilier avec l'hypothèse de sources minérales venues de la profondeur. On ne saurait, non plus, admettre que le dépôt ait été fait par des eaux qui auraient filtré à travers les terrains suessoniens situés au-dessous du calcaire à Mélobésies ; car, si ces terrains renferment des phosphates sédimentaires, ils doivent être, comme les phosphates de même âge des départements d'Alger et de Constantine, incomparablement plus riches en fluor, et, par conséquent, leur dissolution par les eaux aurait certainement donné naissance à des dépôts de phosphorites beaucoup plus fluorées que ne le sont les phosphorites des grottes du Cheliff (*).

(*) J'ai cherché à me rendre compte des résultats que pouvait donner l'action de l'eau sur des phosphates naturels, plus ou moins fluorés. 5 grammes du phosphate sédimentaire de Beauval, riche en fluor (LXXVIII), ont été mis, après pulvérisation, dans de l'eau distillée, saturée d'acide carbonique à la pression ordinaire ; après quelques jours de digestion, on a décanté et renouvelé le liquide. Le même traitement, renouvelé pendant deux mois environ, a donné un résidu insoluble et une dissolution, qui a été évaporée ; puis on a dosé l'acide phosphorique et le fluor dans chaque partie :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | $\frac{fl}{P^2O^5}$ |
|---|---|---|---|
| Phosphate naturel (5 gr.) ..... | 37,20 | 3,26 | $\frac{1}{11.4}$ |
| Résidu indissous (4gr,12) ..... | 41,92 | 3,66 | $\frac{1}{11.4}$ |
| Partie dissoute (0gr,88)..... | 14,35 | 1,21 | $\frac{1}{11.8}$ |

## Phosphates alumineux.

C'est aussi à l'action des eaux superficielles ayant lavé des débris organiques phosphatés, qu'il convient de rapporter la formation de certains phosphates alumineux, comme ceux des cavernes qui ont été récemment étudiées dans l'Oranais et dans l'Hérault.

M. Armand Gautier a décrit avec détail (*) les découvertes qu'il a faites avec son frère dans la *grotte de Minerve*, située près du hameau de Fouzan (Hérault) sur la paroi rocheuse qui domine la rivière de la Cesse.

Il expose que cette grotte est ouverte suivant une faille presque verticale, qui met les schistes dévoniens en contact avec le calcaire éocène à Alvéolines. On a trouvé dans cette caverne une riche collection d'ossements d'animaux quaternaires et d'abondants dépôts de phosphates, dont la masse peut, dit-il, dépasser 120.000 tonnes.

Cette masse ne comprend pas seulement des phosphates tribasiques de chaux, mais aussi des phosphates blancs, farineux, où il reconnut un phosphate hydraté bicalcique (*brushite* ou *métabrushite*), déjà rencontré et décrit dans les guanos des Antilles, et un phosphate alumineux nouveau, auquel il donna le nom de *minervite*.

L'analyse que j'ai faite de ce minéral (XLII), dont l'aspect rappelle celui du kaolin, montre (**) que c'est un phosphate hydraté et légèrement acide d'alumine et de potasse, avec traces d'ammoniaque, de chaux, de magnésie

---

On voit que les teneurs en fluor et en acide phosphorique ont augmenté dans la partie insoluble et sont devenues moindres dans la partie dissoute ; cela se comprend aisément, parce que le phosphate naturel renfermait du carbonate de chaux, qui s'est dissous plus aisément que le fluophosphate. Mais le *rapport* entre la teneur en fluor et la teneur en acide phosphorique n'a pas varié d'une manière bien sensible.

Répétée sur un os fossile riche en fluor, l'expérience a donné des résultats analogues :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | $\frac{fl}{P^2O^5}$ |
|---|---|---|---|
| Côte d'Halitherium en poudre. | 18,85 | 1,67 | $\frac{1}{11.25}$ |
| Résidu indissous..... | 20,02 | 1,78 | $\frac{1}{11,24}$ |
| Partie indissoute..... | 11,37 | 0,96 | $\frac{1}{11,84}$ |

En opérant, au contraire, sur un os moins fluoré, on observe une diminution sensible dans la teneur en fluor de la partie dissoute :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | $\frac{fl}{P^2O^5}$ |
|---|---|---|---|
| Os d'Acerotherium..... | 35,70 | 0,89 | $\frac{1}{40.1}$ |
| Résidu indissous..... | 38,20 | 0,97 | $\frac{1}{39.5}$ |
| Partie dissoute..... | 10,42 | 0,11 | $\frac{1}{97.4}$ |

On est donc fondé à conclure de ces essais que les phosphates, dont la teneur en fluor est voisine de celle de l'apatite, sont presque intégralement dissous par l'eau chargée d'acide carbonique ; la proportion de fluor baisse d'une façon peu sensible dans la portion dissoute.

Au contraire, les os fossiles incomplètement fluorés abandonnent à l'eau carbonique une partie de phosphate, où la proportion de fluor est notablement moindre que dans la partie insoluble.

On arrive à un résultat semblable en opérant sur un mélange de phosphate fluoré et de phosphate sans fluor. Par exemple 10 grammes d'un mélange à parties égales de phosphate de Beauval (LXXVIII) et de phosphorite de Caylus (XX) ont donné :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | $\frac{P^2O^5}{fl}$ |
|---|---|---|---|
| Résidu indissous (8gr,23)..... | 37,70 | 1,91 | $\frac{1}{19.7}$ |
| Partie dissoute (1gr,77)..... | 13,28 | 0,53 | $\frac{1}{25.0}$ |

On voit que le phosphate tribasique de chaux est plus soluble que le phosphate fluoré, puisque le rapport entre les quantités du fluor et d'acide phosphorique a diminué dans la partie dissoute et augmenté dans la partie indissoute.

(*) *Annales des Mines*, 1894, 1er semestre.

(**) *Annales des Mines*, 1895, 2e semestre, p. 319.

et d'oxyde de fer, presque entièrement dépourvu de fluor :

| | XLII |
|---|---|
| Acide phosphorique | 37,28 |
| Alumine | 18,59 |
| Peroxyde de fer | 0,83 |
| Potasse | 8,28 |
| Chaux | 1,40 |
| Magnésie | 0,33 |
| Ammoniaque | 0,52 |
| Eau perdue à 180° | 23,70 |
| Perte de poids de 180° au rouge | 4,50 |
| Sable, argile | 4,35 |
| Fluor, chlore, acide sulfurique | traces |
| | 99,78 |

M. Gautier a expliqué la production de ces différents phosphates par une transformation de matières organiques azotées, sous l'influence de ferments oxydants ayant donné naissance à des phosphates ammoniacaux, qui se sont eux-mêmes convertis, au contact de calcaires et d'argiles ou d'hydrates d'alumine, en phosphates tri- et bicalcique et en phosphate alumino-potassique ; il devait se produire, en même temps, des nitrates ; mais ces sels très solubles ont été entraînés par les eaux d'infiltration.

J'ai retrouvé la minervite, avec une composition à peu près identique, dans de petites masses blanches (XLIII) que m'a envoyées M. Pallary (*) à la suite d'une exploration faite dans une caverne à phosphates qui a été exploitée, il y a peu d'années, à la Tour Combes, à $10^{kil},4$ d'Oran sur la route de Tlemcen, dans la commune de Misserghin :

(*) *Annales des Mines*, 1895, t. II, p. 314.



| | XLIII |
|---|---|
| Acide phosphorique | 35,17 |
| Alumine | 18,18 |
| Potasse | 5,80 |
| Ammoniaque | 0,48 |
| Chaux | 0,31 |
| Eau avec un peu de matière organique : perte à 100° | 13,40 |
| — de 100 à 180° | 10,55 |
| Perte de 180° au rouge | 4,35 |
| Magnésie, fluor, chlore, acide sulfurique | traces |
| | 99,84 |

Les renseignements donnés par M. Pallary font voir que cette grotte a dû être remplie par les eaux de surface, apportant les produits du lessivage de débris organiques, puis s'infiltrant dans le sol, où pouvaient se produire des composés nouveaux, et abandonnant peu à peu les substances dissoutes.

Il y a une quinzaine d'années, j'avais eu à examiner un échantillon de phosphate alumineux, présenté au Bureau d'essai comme provenant de l'îlot du Commandeur, situé en face de la côte de la Guyane. L'analyse de cette matière concrétionnée rougeâtre (XLIV) donna :

| | |
|---|---|
| Acide phosphorique | 34,88 |
| Alumine | 28,60 |
| Chaux | 0,80 |
| Magnésie | 0,15 |
| Peroxyde de fer | 9,00 |
| Argile | 2,00 |
| Eau et matières organiques | 24,00 |
| | 99,43 |

Mon attention ne se portant pas, à cette époque, sur la présence du fluor dans les phosphates, je ne saurais affirmer qu'il ne s'en trouvait aucune trace dans la matière ; mais je suis porté à le croire d'après les essais faits sur les autres échantillons de phosphates alumineux hydratés.

Les indications, malheureusement trop vagues, que je pus obtenir sur le gisement de ce phosphate, me font supposer que son origine doit être attribuée, comme dans les cas précédents, au lavage par les eaux de pluie de quelque abondant dépôt de guano et à la réaction des dissolutions sur les matériaux du sol sous-jacent.

### Conclusions.

Résumons en peu de lignes les observations faites, d'après l'étude des divers gisements de phosphorites, sur le mode de formation de ces substances.

On savait déjà qu'elles ont toujours été produites par dissolution et dépôt ultérieur des matières qui les composent.

Il ne nous semble pas que ce dépôt puisse être attribué à des eaux minérales venues de la profondeur, dont le régime régulier ne permettrait guère d'expliquer la teneur en fluor souvent très faible et très irrégulière des phosphorites. A notre avis, c'est exclusivement pour les apatites cristallisées ou en masses cristallines ou fibreuses, qu'il y a lieu de croire à l'intervention de phénomènes éruptifs ou de sources thermales.

La production de phosphorites plus ou moins fluorées peut être expliquée souvent par l'action d'eaux douces sur des phosphates sédimentaires ou sur des ossements fossiles; la teneur en fluor peut, d'ailleurs, n'être pas restée la même dans les phosphorites que dans les phosphates primitifs, à raison des gains qui ont pu se produire pendant la filtration des eaux phosphatées au travers du sol.

La décomposition de matières organiques, d'origine animale ou végétale, contenant du phosphore, leur transformation sous l'influence de ferments oxydants et la réaction des produits dissous sur les terrains traversés ou encaissants, peuvent aussi avoir donné naissance à une certaine quantité de phosphates tricalciques, bicalciques ou alumineux, suivant la théorie exposée par M. Armand Gautier. Mais ces phosphates ne sont pas ou sont très peu fluorés, parce qu'ils ont pour origine des substances à peu près dépourvues de fluor.



### III. — Phosphates sédimentaires.

On ne s'était guère occupé, jusqu'à ces dernières années, de déterminer la teneur en fluor des phosphates sédimentaires non plus que des phosphates concrétionnés. Quelquefois seulement on cherchait à constater la présence ou l'absence du fluor par des essais qualitatifs, que la présence de la silice rendait au moins douteux.

M. Charles Delattre fut des premiers, dans son *Étude sur les gisements français de phosphate de chaux* (1882), à tenter de faire le dosage du fluor et à calculer la quantité de fluorure de calcium correspondante, pour la faire figurer dans le tableau de la composition des phosphates. Malheureusement, les procédés de dosage manquaient alors d'exactitude, et les résultats trouvés étaient trop incertains pour éclairer véritablement la question d'origine des phosphates (*).

Plus récemment, M. Henri Lasne, grâce à des analyses exactes et à l'examen très soigné des gîtes qu'il décrivait, put faire des rapprochements intéressants et présenter des idées nouvelles sur l'origine des phosphates de chaux sédimentaires.

(*) C'est ainsi que, dans la brochure de M. Delattre, fort intéressante sous bien des rapports, certaines phosphorites du Quercy figurent avec une teneur en fluor plus élevée que les nodules des sables verts des Ardennes, tandis que leur teneur réelle est incomparablement plus faible.

Après avoir étudié en détail les gites des environs d'Argenton (Indre) (*), puis ceux des environs de Doullens (Somme) (**) et avoir comparativement analysé les phosphates de Grandpré (Ardennes) et ceux de Mons (Belgique), il formula cette conclusion que : « les phosphates sédimentaires sont, en réalité, des fluophosphates à composition définie, identique à celle de l'apatite, c'est-à-dire contenant 1 équivalent de fluor pour 3 équivalents de phosphore (***). »

D'après lui, ces fluophosphates auraient été fournis de toutes pièces par les roches éruptives et cristallophylliennes, où l'on trouve souvent l'apatite en très petits cristaux disséminés ; la désagrégation de ces roches et la dissolution des fluophosphates par les eaux de la mer chargées d'acide carbonique, puis la concentration des sels dissous dans des mers moins profondes et le dégagement partiel de l'acide carbonique contenu, telle serait la série des phénomènes qui auraient donné naissance aux phosphates sédimentaires, c'est-à-dire à des précipités chimiques ayant la même composition que l'apatite primitive. Pour compléter l'explication, il faut encore supposer que ces précipités, d'abord accompagnés de carbonate de chaux et disséminés dans une masse pâteuse, se soient peu à peu réunis en petits nodules et que des eaux chargées d'acide carbonique aient dissous le carbonate de chaux, sans attaquer le fluophosphate (****).

A l'occasion de ce travail, une discussion fort intéressante sur la question des phosphates eut lieu en mars 1891 et mars 1892 devant la Société géologique de France. A la théorie de M. Lasne, appuyée par M. Munier-Chalmas, M. de Lapparent fit diverses objections : des précipi-

(*) Extrait des *Annales géologiques*, 1889.
(**) *Bulletin de la Société géologique de France*, 1890, p. 441.
(***) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 30 juin 1890.
(****) M. H. Lasne, *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1887.



tations minérales ne se comprennent guère, si ce n'est dans des solutions saturées des sels qui se déposent ; on sait, au contraire, que les animaux excellent à extraire du milieu où ils vivent des substances, qui s'y trouvent en si faible quantité que la chimie parvient à peine à les déceler, même qualitativement ; des animaux vivants ont donc dû certainement intervenir pour extraire des eaux marines la dose presque infinitésimale d'acide phosphorique qu'elles renferment (*).

Cette observation nous paraît fort juste.

Il n'est pas douteux que des organismes vivants, animaux ou végétaux, sont capables d'extraire et de concentrer sur une partie de leur être le phosphate de chaux contenu dans les eaux de la mer, comme d'autres organismes en extraient le carbonate de chaux, dont ils forment leurs coquilles, comme d'autres en retirent la silice, la potasse, l'iode, etc. ; c'est aussi par un phénomène de ce genre que le phosphate de chaux est pris dans le sol par les plantes et se concentre dans leurs graines, qu'il est ensuite extrait des plantes ou des graines par les animaux vertébrés et accumulé dans leurs os.

Cependant l'intervention des êtres vivants n'est pas le seul et unique processus par lequel puisse se faire une ségrégation des éléments minéraux.

On sait que la silice dissoute, en se portant sur des restes fossiles au milieu des bancs de calcaires de différents âges, a donné naissance aux nodules de silex, aux meulières, aux bois silicifiés, aux coquilles fossiles épigénisées.

De même, une grande partie des nodules de phosphate de chaux sont des coquilles de mollusques ou des restes végétaux transformés et remplis par la matière phosphatée.

(*) *Compte Rendu sommaire des séances de la Soc. géol.*, 21 mars 1892.

Il ne s'agit pas là d'un remplissage mécanique par introduction de la matière phosphatée dans des cavités préexistantes. On remarque, au contraire (*), que la richesse en acide phosphorique est en raison directe de la ténuité des ouvertures ; lorsque l'orifice est petit, comme dans les oursins, la masse est compacte, dense, homogène et très riche en phosphate ; lorsque l'ouverture est plus grande, on ne trouve souvent que du carbonate de chaux et des grains glauconieux et quartzeux.

Il semble donc que le phosphate de chaux ait pris la place de la matière organique elle-même qui remplissait les coquilles ou qui formait les fibres du bois. Nous ignorons quel a été le mécanisme de cette substitution. On peut supposer qu'elle s'est effectuée par suite d'une disposition spontanée de la matière, comparable à celle qui donne lieu à la cristallisation et à l'accroissement des minéraux au milieu des eaux-mères. On peut aussi songer à l'attribuer au travail de cette légion d'êtres microscopiques, qui se développent sur les corps organisés, après leur mort.

J'ai cherché à me rendre compte si un phénomène analogue pourrait se produire, d'une manière sensible, dans une expérience de laboratoire de courte durée. A cet effet je pris une dizaine de moules, dont le corps isolé de la coquille laissait, à l'incinération, en moyenne, 14 milligrammes de cendres : ces 10 moules furent abandonnées pendant 50 jours (du 11 septembre au 1er novembre 1892) dans un flacon de 2 litres, bouché à l'émeri et contenant 1.500 centimètres cubes d'eau de Seltz et 45 grammes de phosphate tribasique de chaux précipité. Après ce temps, elles furent incinérées et fournirent 314 milligrammes de cendres, c'est-à-dire 174 milligrammes de plus qu'elles n'auraient donné dans l'état primitif (140 milligrammes). La cendre obtenue contenait :

(*) Ch. Delattre, *Étude sur les gisements français de phosphate de chaux*, 1882, p. 40.



| | |
|---|---|
| Phosphate tribasique de chaux..... | 86,88 |
| Carbonate de chaux..... | 11,18 |
| Oxyde de fer et alumine..... | 1,91 |
| | 99,97 |

Le résultat était donc bien conforme aux prévisions.

Une autre expérience plus facile à conduire, à raison de la consistance de la matière, qui ne se putréfiait pas, fut faite sur du bois d'allumettes. L'incinération de 100 parties de ce bois donna 0,44 de cendres, contenant 0,00018 d'acide phosphorique (soit 4,07 p. 100 du poids des cendres).

Après un séjour de 7 mois dans un flacon fermé avec de l'eau distillée, du phosphate de chaux en poudre (5 grammes) et du carbonate d'ammoniaque (2 grammes), 100 parties donnèrent 0,33 de cendres contenant 7,75 p. 100 de leur poids d'acide phosphorique.

En opérant de même, mais avec de l'eau de Seltz au lieu d'eau distillée, la proportion de cendres obtenues fut de 0,66 ; l'acide phosphorique s'y trouvait dans la proportion de 24,25 p. 100.

D'autres tiges d'allumettes furent laissées, pendant 7 mois également, dans un flacon débouché à large ouverture, avec de l'eau et 5 grammes de phosphate de chaux en poudre ; à plusieurs reprises, on laissa l'eau s'évaporer et on en remit d'autre ; puis on sécha et incinéra. On trouva 2,51 p. 100 de cendres, qui renfermaient 38,57 centièmes de leur poids d'acide phosphorique et 52,27 centièmes de chaux.

Il y avait eu, dans les deux premiers cas et surtout dans le troisième, fixation d'une importante proportion de phosphate tribasique de chaux sur la matière ligneuse, et l'on conçoit fort bien qu'à la longue il puisse y avoir épigénie complète et formation de bois phosphatisé.

On peut maintenant rapprocher ces faits d'expériences de ceux que j'ai fait connaître à propos de la fluoration graduelle des ossements fossiles (*), établissant que les os d'animaux, essentiellement composés de phosphate tribasique de chaux, peuvent se charger graduellement de fluorure de calcium dans une dissolution qui renferme un peu de fluorure alcalin ou dans de l'eau qui reste en contact avec du spath-fluor en poudre fine. Je rappellerai que cet accroissement de la teneur en fluor se fait surtout aisément, lorsque, à plusieurs reprises, il y a évaporation de l'eau et addition d'eau nouvelle. Le phosphate tribasique de chaux paraît avoir une tendance marquée à se fluorer jusqu'à prendre la composition de l'apatite.

Cette double série d'expériences permet de conclure que, dans la nature, il peut se produire, sur les matières organiques, dépôt de phosphate tribasique de chaux, et sur le phosphate ainsi formé, fixation de fluorure de calcium.

Rien ne semble, d'ailleurs, s'opposer à ce que les deux phénomènes se réalisent en même temps, si l'eau renferme à la fois des phosphates et des fluorures, et qu'ils produisent, en conséquence, le même effet qu'un dépôt du fluophosphate de chaux, que M. H. Lasne a supposé exister en dissolution dans les eaux de la mer. Mais, au lieu de la composition toujours identique, à laquelle conduit cette supposition, les deux actions indépendantes du phosphate et du fluorure, qu'elles soient successives ou simultanées, peuvent conduire soit à des fluophosphates ayant la composition de l'apatite, soit à des phosphates plus ou moins fluorés que le composé cristallin (**).

(*) *Annales des Mines*, 1893, 1er semestre, p. 185.

(**) Il n'est pas sans intérêt de faire observer que les apatites des roches ou des filons, dont la dissolution aurait, d'après la théorie de M. Lasne, produit les fluophosphates contenus dans la mer, sont, en réalité, en partie fluorées et en partie chlorées ; or les phosphates sédimentaires, comme les os fossiles, sont toujours exclusivement fluorés, malgré la présence d'une quantité considérable de chlorures dans les eaux de la mer.



J'ai déjà fait remarquer, à propos des os fossiles, qu'ils renfermaient très souvent moins de fluor que l'apatite, ce qui s'explique aisément par insuffisance de la quantité de fluorures contenue dans les dissolutions agissantes ou par insuffisance du temps de leur action. J'ai fait remarquer aussi qu'ils pouvaient, au contraire, en contenir davantage, fait qui peut être expliqué par un dépôt de fluorure de calcium, résultant d'une sursaturation de la solution de ce sel dans les eaux de la mer, si elles venaient à s'isoler dans une lagune ou un bassin fermé (*).

Nous retrouverons les mêmes irrégularités dans l'examen des phosphates sédimentaires, car ces phosphates présentent souvent une composition voisine de celle de l'apa-

(*) Comme les eaux de la mer paraissent avoir dû jouer un rôle prépondérant dans la fluoration des phosphates sédimentaires, j'ai tenu à m'assurer, par une expérience directe, de la présence du fluor dans ces eaux et même à en déterminer la proportion avec toute l'approximation possible.

Grâce à l'obligeance de M. de Lacaze-Duthiers, membre de l'Institut, professeur à la Faculté des Sciences, j'ai pu faire venir de son laboratoire de Roscoff une tourie, remplie d'eau de mer à quelques centaines de mètres de distance de la côte. Je me suis attaché à y faire le dosage du fluor avec tout le soin désirable.

42 litres d'eau ont été évaporés à sec (6 jours) dans une grande capsule de porcelaine avec un peu de chaux, destinée à empêcher toute perte de fluorure. Le résidu a été lavé soigneusement avec 8 litres d'eau distillée (10 jours), de manière à dissoudre tous les chlorures, sans entraînement sensible de fluorure de calcium. La masse restante a été calcinée modérément, puis reprise par l'acide acétique étendu, afin de dissoudre le carbonate de chaux, enfin lavée avec 5 litres d'eau, pour enlever le plus possible de sulfate de chaux.

Le résidu, après une légère calcination, pesait encore 66 grammes. Il a été mêlé avec 75 grammes de silice pure et soumis, en deux parties successivement, à l'action de l'acide sulfurique concentré dans un courant lent d'air parfaitement desséché. Les gaz, conduits par un tube rigoureusement sec jusqu'à une dissolution à 15 p. 100 de fluorure de potassium pur, y ont formé un précipité de fluosilicate de potassium, qui, lavé à l'alcool et séché sur filtre taré, s'est trouvé peser 100 milligrammes. La proportion de fluor dégagé à l'état de fluorure de silicium était de $34^{mg},54$ pour les 42 litres d'eau.

Par conséquent, 1 mètre cube d'eau de l'Océan Atlantique renferme $0^{gr},822$ de fluor ou $1^{gr},687$ de fluorure de calcium.

tite, mais quelquefois aussi une proportion de fluor moindre ou plus élevée (*).

---

J'ai cru devoir, dans les pages qui précèdent, rectifier, sur quelques points, les théories géogéniques relatives au mode de formation des phosphates sédimentaires, en m'appuyant sur des expériences nouvelles et sur des analyses nombreuses.

Il me reste à présenter ces analyses, qui embrassent presque tous les types de phosphates sédimentaires, depuis les dépôts siluriens jusqu'aux formations quaternaires ou pléistocènes. J'ai choisi, de préférence, les gites qui offrent une réelle importance au point de vue de la production industrielle; passant donc rapidement sur les phosphates des terrains primitifs, j'insisterai, au contraire, sur ceux des formations crétacées de la France, des couches éocènes de l'Algérie et de la Tunisie et des dépôts tertiaires de la Caroline du Sud et de la Floride, qui sont aujourd'hui les principaux centres d'extraction des phosphates minéraux.

Quelques-uns des échantillons analysés ont été empruntés à la collection de l'École des Mines, particulièrement ceux qui représentent des gites anciennement décrits et, en quelque sorte, classiques ; beaucoup d'autres, surtout provenant de gites dont la mise en valeur est assez récente, m'ont été procurés par les explorateurs, par les ingénieurs qui en ont organisé l'exploitation, ou par les directeurs des usines qui les transforment en produits marchands pour l'agriculture.

Pour un certain nombre de types importants par l'abon-

(*) M. Lasne a récemment signalé des résultats analogues : par exemple, en traitant par l'acide chlorhydrique un ossement fossile de Gourbesville (Manche), il a obtenu un résidu insoluble uniquement composé de fluorure de calcium ; tout le fluophosphate avait été dissous (*Annales de chimie analytiqae*, 1er juin 1896, p. 208).



dance des minerais ou intéressants par quelque autre motif spécial, je donnerai des analyses complètes. Mais, dans beaucoup de cas, pour abréger, je me bornerai à faire connaitre :

1° La teneur en acide phosphorique ($P^2O^5$) ;

2° La teneur en fluor ($fl$) ;

3° La teneur en fluor (Fl) de l'apatite normale correspondante, c'est-à-dire renfermant une égale quantité d'acide phosphorique ;

4° Le rapport calculé de ces deux teneurs $\left(\frac{fl}{F}\right)$ qui permet d'apprécier, le plus aisément possible, par comparaison, le degré de fluoration des phosphates.

### Terrain silurien.

La plus ancienne couche de phosphate, qui ait fait l'objet d'une exploitation industrielle, est située dans le Nord du Pays de Galles, près de Llanfyllin ; elle appartient au grès de Caradoc (faune seconde du système silurien). On y trouve des nodules concrétionnés et colorés en noir par du graphite, renfermant environ 30 p. 100 d'acide phosphorique, réunis par un ciment noirâtre et pyriteux, qui contient lui-même 19 à 20 p. 100 d'acide phosphorique (*).

Dans les schistes siluriens de la Podolie, on a également observé l'existence de concrétions sphériques de phosphate de chaux, brunes ou noires, de structure fibreuse, avec noyaux terreux ou calcaires. Schwakhöfer (**), qui a fait l'étude de ce gite, considère le phosphate comme résultant d'un métamorphisme de nodules de carbonate de chaux sous l'influence d'eaux d'infiltration qui s'étaient chargées des phosphates en traversant les schistes siluriens.

(*) Davies, *Geolog. Magazine*, 1867 ; *Quart. J. of Geol.*, 1875.
(**) *Jahrb. geol. Reichsanstalt*, XXI.

L'analyse lui a donné les résultats suivants (XLV) :

| | |
|---|---|
| Phosphate de chaux | 87,90 |
| Fluorure de calcium | 7,29 |
| Carbonate de chaux | 0,61 |
| Oxyde de fer | 1,06 |
| Oxyde de manganèse | 0,57 |
| Argile | 1,01 |
| Silice | 0,32 |
| Substance organique | 0,79 |
| Eau | 0,53 |
| | 100,08 |

Le fluor dosé est donc $fl = 3{,}54$.

Le fluor de l'apatite normale $Fl = 3{,}59$.

Le rapport $\frac{fl}{Fl} = 0{,}986$ indique une composition très voisine de l'apatite.

### Terrain dévonien.

On exploite dans le Nassau, sur les bords de la Diel et de la Lahn, des phosphates en forme de nodules disséminés dans un dépôt argileux, qui s'étend au-dessus de dolomies et de calcaires dévoniens ; la même substance, blanche, d'aspect terreux, se retrouve en veines serpentant à travers les couches de dolomie.

L'analyse sommaire a donné, p. 100 (XLVI) :

| | |
|---|---|
| Acide phosphorique | 31,80 |
| Fluor ($fl$) | 2,46 |
| Fluor de l'apatite normale (Fl) | 2,84 |

$$\text{Rapport} = \frac{fl}{Fl} = 0{,}84.$$

Mais je dois faire observer que les phosphates du Nassau ne sont pas de véritables phosphates sédimentaires ; plusieurs géologues les ont rapportés à des phénomènes



filoniens, tandis que d'autres y ont vu un dépôt tertiaire plutôt que dévonien.

Dans le Tennessee (États-Unis d'Amérique) on a découvert en 1892 et, bientôt après, quatre sociétés ont commencé à exploiter un gîte sédimentaire de phosphate appartenant au terrain dévonien. Ce niveau paraît considérable ; il s'étend sur plusieurs comtés. On y a signalé une couche de nodules phosphatés à la partie supérieure, puis un banc de schistes noirs, dits de Chattanooga, et, au-dessous, une couche régulière de phosphate reposant sur des bancs de calcaire. La couche est continue et présente de $0^m{,}30$ à 3 mètres de puissance. Le minerai est noir, assez compact, de composition irrégulière et complexe. On y trouve, avec le phosphate de chaux, du phosphate d'alumine, du fluorure de calcium, du carbonate de fer, de l'oxyde de fer magnétique, de la pyrite de fer, etc. L'analyse complète d'un échantillon, que m'a remis M. Ladureau, a donné (XLVII) :

| | |
|---|---|
| Phosphate de chaux | 52,72 |
| Phosphate d'alumine | 10,43 |
| Fluorure de calcium | 7,62 |
| Sulfate de chaux | tr. |
| Carbonate de fer | 5,64 |
| Magnétite | 0,86 |
| Pyrite de fer | 9,42 |
| Silice, argile | 2,35 |
| Substance organique | 0,78 |
| Eau | 1,85 |
| | 100,67 |

L'acide phosphorique dosé ($P^2O^5$) = 30,20 p. 100 et le fluor ($fl$) = 3,67 ; le fluor calculé pour l'apatite normale est seulement (Fl) = 2,69. Le rapport $\left(\frac{fl}{Fl}\right)$ atteint donc la valeur 1,36, ce qui suppose l'existence dans le minéral

d'une quantité notable de fluorure de calcium en dehors du composé fluophosphaté correspondant à l'apatite.

### Terrain carbonifère.

On sait que Berthier, après avoir reconnu, en 1818, l'existence du phosphate de chaux mêlé à la pyrite de fer dans les nodules crétacés de Wissant (Pas-de-Calais), fit, en 1825, une découverte semblable dans les nodules du terrain houiller de Fins (Allier) ; le phosphate de chaux y est associé au fer carbonaté lithoïde et à de l'argile en rognons terreux noirâtres disséminés dans les schistes argileux. Ce gite n'a pas été exploité. Mais on a trouvé plus tard (1861) deux rognons noirs analogues dans les argiles schisteuses noires du bassin de la Ruhr, à Sprockhövel, et on a pu les utiliser pour la fabrication de superphosphate dans l'usine de Hörde.

Ces nodules, comme ceux du terrain silurien, paraissent devoir être attribués à un dépôt de phosphate de chaux laissé par des eaux d'infiltration.

On a également employé dans l'industrie une phosphorite terreuse, à structure un peu concrétionnée, mêlée de parties blanches et de parties brunâtres, trouvée à Baelen, dans le Limbourg belge. Elle paraît être d'origine geysérienne et a été rapportée à l'époque crétacée ou même à l'époque tertiaire, bien qu'elle se rencontre en veines dans le calcaire carbonifère.

L'essai d'un échantillon pour acide phosphorique et fluor a donné (XLVIII) :

$$P^2O^5 = 24{,}66 ; \qquad fl = 1{,}98 ; \qquad Fl = 2{,}19 ; \qquad \frac{fl}{Fl} = 0{,}90.$$



### Terrain permien.

On ne connaît pas de gite régulier et continu de phosphates dans ce terrain ; mais on a signalé des concrétions de phosphorite dans le grès rouge (*Rothliegende*) de Bohême et dans des argiles rougeâtres permiennes du Var. On connaît aussi des nodules disséminés dans les schistes bitumineux du *Zechstein*, nodules qui ont été reconnus pour être des coprolithes de sauriens. J'ai fait l'essai de trois coprolithes venant du bassin permien d'Autun (Saône-et-Loire), de couleur noirâtre et d'aspect résineux :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| XLIX ..... | 23,53 | 2,13 | 2,10 | 1,01 |
| L..... | 23,50 | 2,00 | 2,10 | 0,95 |
| LI..... | 36,03 | 3,57 | 3,24 | 1,11 |

### Trias.

On a signalé dans le trias de Lunéville des coprolithes nombreux, dans celui du Var des nodules de formes bizarres, ayant par exemple la forme de petites pommes accolées ; mais les échantillons qui m'ont été remis, comme nodules de Boson (Var), étaient exclusivement calcaires et nullement phosphatés.

### Terrain liasique.

Le terrain liasique est, en France, l'un des mieux pourvus en phosphate de chaux ; il présente, à plusieurs niveaux, des couches de nodules, sans parler des éléments

phosphatés disséminés dans ses calcaires argileux et dans les minerais de fer oolithiques de ses bancs supérieurs.

Les nodules phosphatés du lias ont été, pour la première fois, reconnus par de Bonnard, en 1822, dans l'arrondissement de Semur. Plus récemment, différentes couches ont été découvertes et étudiées par M. Collenot (1872) dans l'étage sinémurien et dans les étages supérieurs de la Côte-d'Or et de l'Yonne : elles ont été retrouvées dans la Haute-Saône, la Haute-Marne, les Vosges, la Meuse et les Ardennes, ainsi que dans le Cher, l'Indre et les Deux-Sèvres.

Les gisements de Semur et d'Arnay-le-Duc et plusieurs autres parmi ceux qui viennent d'être cités ont, depuis 1876, donné lieu à des exploitations de quelque importance.

Ces exploitations s'appliquent presque toujours à des couches argileuses provenant de l'altération et de la dissolution par les eaux d'assises argilo-calcaires, telles que le calcaire à Gryphées arquées ; il y a eu concentration des phosphates dans un limon argileux et ferrugineux au pied des collines, qui montrent, en place, le calcaire phosphaté non altéré.

Dans l'Auxois, les nodules appartiennent à l'étage inférieur du lias proprement dit (sinémurien) ; puis, l'épaisseur du lit de phosphates varie, en général, de $0^m,10$ à $0^m,20$ ; elle s'élève quelquefois, par exception, à $0^m,30$ ou $0^m,40$ ; la masse du limon est trois ou quatre fois aussi considérable ; elle atteint parfois 2 ou 3 mètres d'épaisseur. Les nodules sont friables et ne peuvent être lavés que sur le crible. Après cette opération, ils ont une teneur en acide phosphorique comprise entre 27 et 29, rarement 30 p. 100. Le phosphate, examiné au microscope polarisant, se montre complètement amorphe.

L'essai m'a donné les résultats suivants sur deux nodules provenant de Semur (Côte-d'Or), d'aspect terreux,



avec fossiles empâtés, de couleur blanc jaunâtre :

| | $P^2O^5$ | $\frac{P^2O^5}{Fl}$ | Fl | $\frac{Fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LII..... | 28,40 | 2,05 | 2,53 | 0,81 |
| LIII..... | 26,40 | 2,14 | 2,35 | 0,91 |

Trois analyses complètes, de M. Ch. Delattre, achèveront de faire connaître la composition de ces phosphates.

| | LIV | LV | LVI |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique..... | 27,06 | 28,59 | 29,71 |
| Acide sulfurique ..... | traces | 0,17 | 0,17 |
| Acide carbonique..... | 2,60 | 2,50 | 2,20 |
| Fluor..... | 1,75 | 2,40 | 1,55 |
| Chaux ..... | 35,84 | 37,92 | 38,08 |
| Magnésie..... | traces | 0,18 | traces |
| Alumine ..... | 2,40 | 2,47 | 2,63 |
| Oxyde de fer ..... | 7,35 | 7,24 | 7,45 |
| Silice ..... | 18,00 | 14,40 | 14,20 |
| Eau à 100°..... | 2,10 | 1,60 | 1,20 |
| Matières volatiles au rouge sombre.... | 2,10 | 2,50 | 2,30 |
| | 99,20 | 99,97 | 99,49 |

On en tire :

| | $P^2O^5$ | $\frac{P^2O^5}{Fl}$ | Fl | $\frac{Fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LIV..... | 27,06 | 1,75 | 2,41 | 0,73 |
| LV..... | 28,59 | 2,40 | 2,55 | 0,94 |
| LVI..... | 29,71 | 1,55 | 2,65 | 0,58 |

Dans le département de l'Indre, les nodules phosphatés que l'on a exploités sur la lisière du Plateau Central, depuis Celon jusqu'à Neuvy-Saint-Sépulcre, occupent la base de l'étage moyen du lias (liasien ou charmouthien). Le phosphate y est amorphe, comme dans l'Auxois ; il ne prend parfois un aspect cristallin que par suite du mélange avec du carbonate de chaux ; il est alors gris, en général, tandis que le phosphate le plus riche est blanc et poreux. La couche exploitée présente une épaisseur de $0^m,15$ à $0^m,25$ et fournit de 60 à 100 kilogrammes de nodules au mètre carré de découvert.

M. Lasne a décrit en grand détail les diverses circonstances du gisement et les a très judicieusement expliquées dans une étude spéciale sur la géologie de cette région (*). Il a donné l'analyse complète de deux échantillons, d'un gris clair, venant le premier de Bazaiges, le second de Neuvy (Indre).

| | LVII | LVIII |
|---|---|---|
| Acide phosphorique | 26,61 | 29,81 |
| Acide sulfurique | 1,31 | 1,10 |
| Acide carbonique | 4,58 | 4,05 |
| Chaux | 38,07 | 41,07 |
| Magnésie | 0,58 | 0,36 |
| Fluorure de calcium | 4,88 | 5,35 |
| Alumine | 2,79 | 1,73 |
| Peroxyde de fer | 3,01 | 2,15 |
| Silice et silicates insolubles | 13,77 | 8,95 |
| Matière organique et eau (après dessiccation sur l'acide sulfurique) | 4,32 | 4,93 |
| | 99,92 | 99,50 |

d'où l'on tire :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LVII | 26,61 | 2,37 | 2,39 | 0,99 |
| LVIII | 29,81 | 2,60 | 2,66 | 0,98 |

Les proportions relatives de fluor et d'acide phosphorique se trouvent donc ici identiques avec celles de l'apatite normale, tandis qu'elles en diffèrent dans les nodules phosphatés de l'Auxois. Aussi suis-je porté à croire, comme je l'ai, d'ailleurs, expliqué plus haut, qu'il n'y a pas eu dissolution de fluophosphate dans les mers du lias et dépôt de ce composé avec le carbonate de chaux, suivant la théorie de M. Lasne, mais fixation sur les substances organiques, végétales ou animales, de calcaire et de phosphate plus ou moins fluoré dès l'abord et dont la

(*) *Contribution à l'étude géologique du département de l'Indre*, par M. Henri Lasne, 1889 ; G. Masson, éditeur.



fluoration a pu se continuer par la suite au contact de l'eau de la mer, de manière à donner un produit final plus ou moins voisin de l'apatite, tantôt un peu moins fluoré comme à Semur, tantôt avec un certain excès de fluor, comme nous en trouverons des exemples dans les nodules crétacés.

Sur les autres points abordés par M. Lasne, je ne puis que souscrire aux judicieuses inductions qu'il tire du minutieux examen des gisements phosphatés de l'Indre.

Dans les étages du *système jurassique* situés au-dessus du lias, il a été trouvé plusieurs niveaux phosphatés, notamment dans le bajocien du Calvados et de l'Anjou, dans l'oxfordien de la Nièvre et du Cher, dans le kimmeridgien du Calvados ; mais aucun d'eux n'a été exploité.

### Terrain crétacé inférieur.

Sans nous arrêter aux rares nodules phosphatés qui ont été trouvés dans les couches néocomiennes et aptiennes, arrivons tout de suite aux gisements si réguliers de l'étage albien, qui ont été, depuis près de quarante ans, l'objet de très nombreuses exploitations en France. Rappelons d'abord, en quelques mots, les débuts de cette industrie si importante.

Les nodules des sables verts, depuis longtemps connus dans les Ardennes, sous le nom de coquins ou de crottes du diable, à raison de leur forme bizarre, mais dont on ignorait la nature, furent, pour la première fois, analysés par M. Meugy, en 1852 et 1853 ; les premiers travaux d'extraction furent entrepris, en 1855, par M. Desailly, qui créa, en 1856, dans les environs de Grandpré, la première usine destinée à la pulvérisation des phosphates en France.

En 1856, paraissait l'étude magistrale d'Élie de Beaumont sur les gisements géologiques de phosphates et sur

l'utilité de leur emploi agricole. En même temps MM. de Molon et Thurneyssen se livraient à d'actives recherches sur les gites appartenant à la zone des grès verts et constataient l'existence de la chaux phosphatée dans trente-neuf départements (1857).

Les nodules phosphatés sont contenus principalement dans l'assise des *grès verts*, inférieure à la couche argileuse du *Gault ;* les affleurements de cette assise forment comme un vaste cordon, qui entoure le bassin de Paris depuis les Ardennes et la Meuse jusqu'en Normandie ; ils se retrouvent dans le Pas-de-Calais, dans le pays de Bray et sur d'autres points du bassin.

La couche varie entre 5 et 20 centimètres d'épaisseur ; la moyenne peut être évaluée à $0^m,12$.

Les nodules sont le plus souvent isolés, lisses et mamelonnés, grisâtres ou d'un brun verdâtre à la surface, brun noirâtre dans la cassure ; ils sont quelquefois soudés en masse continue au milieu du sable. Ils renferment souvent des fossiles ou des bois phosphatés ; on y trouve aussi, avec du sable glauconieux, de l'argile, parfois de la pyrite ou du gypse, de l'oxyde de fer et des matières organiques un peu azotées.

Un second lit de nodules phosphatés existe au-dessus du gault, à la base de la couche siliceuse appelée *gaize* et caractérisée par la nature de la silice contenue, qui est en grande partie soluble dans les alcalis. Ce second lit phosphaté, découvert par M. Desailly, est moins régulier que le premier ; les nodules y sont poreux et souvent beaucoup plus friables ; mais ils ont une teneur plus élevée, tout en contenant le même genre d'impuretés que les nodules du gault.

Les nodules de la gaize ne se trouvent que par places à la base du massif formé par cette roche dans les départements des Ardennes, de la Meuse et de la Marne. Les nodules du gault, au contraire, se montrent non seulement



sur tout le pourtour du bassin de Paris, mais aussi dans le bassin du Rhône et notamment dans les départements de l'Ain et de la Haute-Savoie, de la Drôme, du Vaucluse, de l'Ardèche et du Gard.

Dans la Drôme et l'Ardèche, les nodules forment une série de lits assez minces, espacés au milieu des sables verts, qui occupent une hauteur totale de 6 à 12 mètres (Saint-Paul-Trois-Châteaux, Clansayes, Saut de l'Egue).

Dans l'Ain, à la Perte du Rhône, près Bellegarde, les nodules, d'un vert grisâtre clair, consistent principalement en coquilles phosphatées; ces coquilles appartiennent aux espèces du gault et de la gaize et se trouvent dans trois bancs sableux, dont l'épaisseur totale est de $1^m,80$ ; le sable lui-même est sensiblement phosphaté, ce qu'on attribue à la présence de menus fragments de fossiles.

Ce sont aussi des coquilles et des débris fossiles, avec des concrétions amorphes, qui constituent le gîte des phosphates du Bas-Boulonnais ; les nodules y sont empâtés dans l'argile grise très compacte du gault, immédiatement au-dessus des sables verts.

J'ai soumis à l'essai pour acide phosphorique et fluor une série d'échantillons de nodules appartenant aux trois assises superposées des sables verts, du gault et de la gaize.

1° Sables verts :

LIX. — Nodules vert sombre, de Macheromenil (Ardennes) ;

LX. — Nodules grisâtres, d'aspect terreux, de la Giberie (Aube) ;

LXI. — Nodules noirâtres avec parties brunes, de Triancourt (Meuse) ;

2° Gault :

LXII-LXIII. — Coquilles phosphatées, d'un gris verdâtre clair, avec glauconie, de Bellegarde (Ain) ;

3° Gaize :

LXIV. — Nodules compacts, gris à la surface, d'un

brun noirâtre à l'intérieur, de Croix-Saint-Hilaire (Ardennes).

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LIX | 20,80 | 1,78 | 1,85 | 0,96 |
| LX | 21,82 | 1,87 | 1,95 | 0,96 |
| LXI | 24,50 | 2,10 | 2,18 | 0,96 |
| LXII | 20,90 | 2,12 | 1,86 | 1,14 |
| LXIII | 13,32 | 1,41 | 1,19 | 1,18 |
| LXIV | 25,10 | 2,21 | 2,24 | 0,98 |

La teneur en fluor est, comme on le voit, très voisine de celle de l'apatite correspondante dans les nodules des sables verts et de la gaize du bassin de Paris; elle est sensiblement plus élevée dans les coquilles de Bellegarde.

J'emprunterai à M. Ch. Delattre quelques analyses complètes de phosphates des différentes régions :

LXV. — Nodules de la gaize de Grandpré (Ardennes).

LXVI. — Nodules des sables verts de Grandpré (Ardennes).

LXVII. — Nodules des sables verts de Dombasle (Meuse).

LXVIII. — Nodules des sables verts de Fiennes (Pas-de-Calais).

| | LXV | LXVI | LXVII | LXVIII |
|---|---|---|---|---|
| Acide phosphorique | 23,46 | 19,57 | 18,23 | 20,72 |
| Acide sulfurique | 0,89 | 0,85 | 0,79 | 0,89 |
| Acide carbonique | 5,65 | 5,80 | 4,50 | 4,20 |
| Fluor | 1,62 | 1,66 | 1,31 | 1,83 |
| Chaux | 40,48 | 31,81 | 27,66 | 33,71 |
| Magnésie | 0,50 | 0,36 | traces | traces |
| Alumine | 2,15 | 3,36 | 2,30 | 3,25 |
| Oxyde de fer | 2,87 | 4,89 | 5,85 | 3,15 |
| Silice | 15,40 | 24,80 | 32,06 | 25,20 |
| Eau à 100° | 1,15 | 2,20 | 1,75 | 1,40 |
| Mat. volatiles au rouge sombre | 4,90 | 4,55 | 4,80 | 5,30 |
| | 99,07 | 99,85 | 99,25 | 99,65 |



### Terrain crétacé supérieur.

Les différentes couches du terrain crétacé renferment presque toujours une proportion notable de phosphates; c'est à cette circonstance, en même temps qu'à la présence des limons quaternaires sur d'autres parties de leur territoire, que la Flandre et les régions voisines doivent leur grande fertilité.

On peut signaler des niveaux phosphatés dans le Cénomanien, dans le Turonien et dans le Sénonien.

1° *Cénomanien*. — Il existe à la base de la *craie glauconieuse* une couche de phosphates assez régulière sur le pourtour du bassin de Paris; elle prend parfois assez d'importance pour mériter l'exploitation, notamment dans les Ardennes, le Nord et le Pas-de-Calais, la Seine-Inférieure, l'Orne, l'Eure-et-Loir, la Sarthe.

Je citerai particulièrement les exploitations de Pernes-en-Artois (Pas-de-Calais), qui ont été ouvertes, en 1877, et ont fourni un minerai fort recherché à raison de sa porosité, de sa friabilité, qui permet de le réduire aisément en poudre fine, et, en même temps, à cause de sa teneur, non seulement en acide phosphorique, mais aussi en potasse et en matière organique azotée. Une analyse de MM. Maret et Delattre a donné :

| | |
|---|---|
| Acide phosphorique | 27,00 p. 100 |
| Potasse soluble dans l'acide nitrique | 0,56 — |
| Matières organiques (2,82); azote | 0,067 — |

Les nodules occupent une couche dont l'épaisseur varie de $0^m,15$ à 1 mètre, reposant sur un lit d'argile qui représente le gault et supportant un banc de sables verts, glauconieux, qui sont eux-mêmes recouverts par une marne compacte, équivalent local de l'argile glauconieuse ou *tourtia*.

On a soumis à l'essai un échantillon de ces nodules terreux, à surface grisâtre et à cassure brune, provenant des exploitations de Pernes, et on a trouvé :

| | $P^2O^5$ | $\frac{P^2O^5}{3}$ | Fl | $\frac{P^2O^5}{3\,Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXIX | 20,80 | 1,76 | 1,85 | 0,95 |
| LXX | 37,20 | 3,26 | 3,22 | 0,98 |

D'autre part, la *Statistique de l'Industrie minérale* pour 1888 a donné l'analyse suivante d'un échantillon de Pernes, pris comme type de phosphate peu riche :

| | |
|---|---|
| Acide phosphorique | 20,97 |
| Acide carbonique | 6,40 |
| Acide sulfurique | 1,20 |
| Chaux | 44,46 |
| Oxyde de fer | 1,60 |
| Alumine | 2,12 |
| Silice | 10,50 |
| Magnésie | 0,50 |
| Potasse | 4,47 |
| Matière organique | 3,12 |
| Perte au feu | 4,66 |
| | 100,00 |

La Russie (*) possède d'immenses gisements phosphatés qui se rapportent, les uns aux grès ou sables glauconieux de l'étage albien, les autres à la craie glauconieuse ou étage cénomanien. Les premiers sont répandus dans la partie occidentale, notamment dans le gouvernement de Tambow, presque partout recouverts par les steppes; on leur a trouvé des teneurs très variables, de 23 à 37 p. 100 de phosphate tribasique dans les nodules siliceux, de 38 à 50 p. 100 dans les nodules argileux et dans les roches ou dalles, dont l'épaisseur atteint parfois $0^m,60$.

Les phosphates cénomaniens se montrent tantôt en nodules gris, bruns ou noirs, tantôt en dalles ou en blocs

(*) Nivoit, Gisements de phosphates de chaux, *Encyclopédie chimique*.



massifs (*Samorod*), que l'on a exploités de tout temps pour le pavage et l'empierrement des chaussées; on a remarqué que les boues des routes ainsi empierrées produisaient d'excellents effets sur les cultures.

Les gisements cénomaniens s'étendent au sud-ouest de Moscou, principalement dans le gouvernement de Koursk, sur une zone de plus de 150 kilomètres; on y trouve de une à trois couches superposées, parfois même jusqu'à sept veines, mais alors de peu d'importance.

J'ai reçu de M. Mascart quelques échantillons de nodules cénomaniens rapportés par M. Moureaux d'une mission exécutée en juin et juillet 1896 dans le gouvernement de Koursk en vue d'observations magnétiques. L'échantillon (n° LXXI) était un nodule très allongé, gris à la surface, brunâtre dans la cassure et laissait un résidu insoluble de 49 p. 100; le n° LXXII était un nodule noir, caverneux et dense, dans lequel on a encore trouvé près de 35 p. 100 de silice. L'essai pour acide phosphorique et fluor a donné :

| | $P^2O^5$ | $\frac{P^2O^5}{3}$ | Fl | $\frac{P^2O^5}{3\,Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXXI | 15,73 | 1,30 | 1,40 | 0,93 |
| LXXII | 19,44 | 1,84 | 1,72 | 1,07 |

La fluoration est donc voisine de celle de l'apatite ou même un peu supérieure. Je complète ces renseignements par une analyse de M. Nivoit sur un échantillon de nodules cénomaniens de Koursk :

| | |
|---|---|
| Acide phosphorique | 16,48 |
| Acide carbonique | 3,25 |
| Acide sulfurique | 0,33 |
| Chaux | 23,80 |
| Magnésie | tr. |
| Alumine | 1,71 |
| Oxyde de fer | 0,69 |
| Matière siliceuse | 51,53 |
| Matière organique | 1,19 |
| Humidité et perte | 1,02 |
| | 100,00 |

2° *Turonien.* — On trouve dans le département de la Sarthe des nodules verdâtres, intercalés au milieu de couches sableuses de l'étage turonien; mais ils n'ont pas été trouvés assez riches pour faire l'objet d'une exploitation.

Il en est de même dans le département des Ardennes, où l'on trouve, à la base du turonien, dans les marnes à *Belemnites plenus* de Maure (arrondissement de Vouziers) un niveau de nodules phosphatés. M. Cayeux a eu l'obligeance de me remettre deux échantillons de cette provenance : un nodule irrégulier (LXXIII) et un coprolithe de *Macropoma Mantelli* (LXXIV).

L'essai a donné :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXXIII..... | 21,68 | 1,86 | 1,93 | 0,96 |
| LXXIV..... | 32,04 | 2,75 | 2,86 | 0,96 |

Dans le département du Nord, le turonien présente, à sa partie supérieure, en contact avec l'assise à *Micraster cortestudinarium* du sénonien, une assise de calcaire dur, empâtant des nodules phosphatés. Un nodule de cette couche (LXXV) a été recueilli par M. Cayeux à Lezennes, près de Lille; il a montré la composition suivante :

| | |
|---|---|
| Phosphate de chaux..... | 20,30 |
| Fluorure de calcium ..... | 1,05 |
| Carbonate de chaux..... | 65,23 |
| Alumine, oxyde de fer ..... | 2,90 |
| Silice, argile..... | 3,30 |
| Eau et matières organiques .. | 6,80 |
| | 99,58 |

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXXV..... | 9,30 | 0,51 | 0,83 | 0,61 |

3° *Sénonien.* — A la base de l'étage sénonien ou *craie blanche* on a trouvé, en quelques endroits, notamment



dans les Ardennes et la Sarthe, un lit de nodules phosphatés, mais qui s'est montré trop irrégulier pour être exploité.

Les assises supérieures, au contraire, renferment, dans le nord de la France et en Belgique, des gîtes d'une exceptionnelle richesse, qui ont, pour un temps, par le bruit fait autour d'eux, éclipsé tous les autres gîtes français et belges. Ils ont été découverts les uns dans le Hainaut, en 1874, les autres dans la Picardie et l'Artois, en 1886. J'insisterai particulièrement sur les derniers; mais je commencerai par donner quelques indications sur les phosphates de Belgique, dont la connaissance a facilité l'étude des phosphates du nord de la France.

Le gîte très important de Mesvin et Ciply, près de Mons, fut découvert, en 1874, par MM. Cornet et Briart. Il consiste en une masse de craie brunâtre, grossière, peu cohérente, stratifiée en bancs réguliers, qui, sur une hauteur de 5 à 12 mètres, contient une multitude de petits grains bruns arrondis, ne dépassant pas la grosseur d'une tête d'épingle.

Ces grains sont constitués par du phosphate et du carbonate de chaux avec oxyde de fer et matière organique ; ils forment souvent 75 p. 100 de la craie brune, dont la teneur en phosphate tribasique est ordinairement comprise entre 25 et 30 p. 100.

Cette *craie brune phosphatée de Ciply* est recouverte, sur une épaisseur variable, par un cailloutis à nodules phosphatés brunâtres et ciment calcaire, qu'on a appelé *poudingue de la Malogne*.

Ce poudingue remplit les poches qui existent à la partie supérieure de la craie brune ; certaines poches sont pleines d'un sable brun, assez ferrugineux, tenant 60 p. 100 de phosphate tribasique, produit d'un enrichissement local par les eaux, analogue à celui qui sera signalé à Beauval, Orville, etc.

Un calcaire peu consistant, blanc ou jaunâtre, un peu phosphaté, appelé *tuffeau de Ciply*, recouvre le poudingue de la Malogne et complète cette formation, que l'on a d'abord considérée comme appartenant à l'étage danien, mais que sa faune a fait, plus récemment, rattacher à l'étage sénonien, dont elle formerait la partie tout à fait supérieure.

Au dessous se place, encore dans le sénonien supérieur, la craie à *Belemnitella mucronata* et, plus bas, la craie à *Belemnitella quadrata*, qui, l'une et l'autre, font partie du sénonien supérieur de l'Artois et de la Picardie. Le sénonien inférieur, dans la même région, est formé par l'assise de la craie à *Micraster coranguinum* et par l'assise inférieure à *Micraster cortestudinarium*.

C'est à la base de l'assise à *Belemnitella quadrata* que se trouve la craie phosphatée du Nord de la France, sur laquelle nous allons maintenant fixer notre attention.

La première observation sur la craie phosphatée de Beauval (Somme) fut faite en 1849, par M. Buteux, qui la signala de nouveau, en 1862, en circonscrivant le gisement dans une carte géologique de la Somme.

M. de Mercey, qui avait déjà étudié une formation semblable à Hardivilliers (Oise), fit remarquer l'identité des deux gites, en 1863, et y insista de nouveau, en 1867, en rappelant que la craie phosphatée de Beauval était susceptible d'exploitation.

Mais on ignorait encore la nature et l'importance de masses sableuses, qui avaient été exploitées depuis un temps immémorial et employées, soit dans la construction, soit dans la céramique, pour donner aux briques une patine violette estimée dans le pays (*).

En mai 1886, M. Merle, géologue, étant à la recherche

(*) Rapports des ingénieurs des Mines, en 1887. *Statistique de l'industrie minérale*, 1888.



de gites de phosphates et visitant celui de Beauval, recueillit et fit analyser ces sables ; on y trouva près de 70 p. 100 de phosphate tribasique de chaux. Dès lors, l'exploitation en devait être des plus avantageuses. Aussitôt que cette découverte fut divulguée, un grand nombre de sondages furent entrepris de tous côtés, et une sorte de fièvre s'empara du pays. On reconnut une série de gisements non seulement dans la Somme, mais aussi dans l'Oise et le Pas-de-Calais.

Les sables phosphatés sont contenus dans des poches plus ou moins régulières de la craie, ordinairement en forme d'entonnoirs, qu'ils remplissent quelquefois, mais dont, plus souvent, ils tapissent les parois. Ils sont recouverts presque partout par une argile rougeâtre, chargée de silex assez volumineux, désignée dans le pays sous le nom de *bief à silex*, qui paraît provenir de la dissolution, à l'époque tertiaire, des portions calcaires de la craie argileuse avec silex, qui surmontait la craie à *Belemnitella quadrata*. Cette argile a comblé les entonnoirs, nivelé le terrain et a été recouverte par les limons et la terre végétale.

Il résulte de toutes les observations faites sur les gîtes de sables riches, qu'ils proviennent du remaniement de la craie phosphatée. L'action dissolvante des eaux de surface, plus ou moins chargées d'acide carbonique, s'exerçant plus énergiquement sur le carbonate de chaux que sur le phosphate, a produit un enrichissement de la matière phosphatée, qui a rempli les dépressions de la craie et les poches ou entonnoirs provenant de l'érosion des couches crayeuses. Ces remaniements paraissent s'être produits vers la même époque que les phénomènes qui ont donné lieu au dépôt de l'argile rouge ou bief à silex.

Quant à la craie phosphatée elle-même, avec ses grains de phosphate disséminés dans la masse crayeuse, les observations des géologues qui l'ont le mieux étudiée per-

mettent aujourd'hui de faire sur son origine des hypothèses plausibles.

On sait, par les travaux micrographiques de M. Cayeux, que la craie du nord de la France a dû se déposer dans des eaux peu profondes et à une assez faible distance des rivages. La craie phosphatée occupe, au milieu des craies sénoniennes, des zones limitées, qui, d'après M. de Mercey, affectent la forme de vastes lentilles, ayant 15 à 20 mètres d'épaisseur et présentant une largeur de 200 ou 300 mètres, tandis que leur plus grande dimension peut atteindre 1.000 mètres.

M. de Mercey a attribué cette disposition en lentilles de la craie phosphatée à la pénétration de la craie ordinaire par des eaux de sources thermo-minérales. Mais on la conçoit mieux encore comme un dépôt de la mer sénonienne, localisé au voisinage des côtes.

Les lentilles de craie phosphatée peuvent, en effet, correspondre à des bas-fonds ou à des lagunes, dans lesquelles les vagues auraient accumulé des débris organiques mêlés aux granules calcaires de la vase à globigérines (*). Les eaux de la mer, qui, tantôt noyaient ces dépôts, tantôt, par suite du reflux de la mer et de l'évaporation subie, se concentraient autour d'eux, devaient naturellement en modifier la nature.

C'est ce que nous apprennent, en effet, les recherches micrographiques de MM. Schlumberger, Stan. Meunier, Termier, Renard et Cornet. Elles ont montré que la craie phosphatée diffère de la craie ordinaire par l'existence de petits débris organiques phosphatisés, tels qu'os et écailles de poissons, moules de foraminifères, etc., mêlés aux granules calcaires. Une partie des grains sont exclusivement composés de phosphate de chaux ; d'autres ont un noyau crayeux entouré d'une pellicule de phosphate cristallin, qui donne la croix noire entre les nicols croisés, comme l'apatite et quelques phosphates concrétionnés.

(*) Renard et Cornet ; *Bull. de la Soc. géol.*, 1891, p. LVI.



En réalité, ce ne sont pas de simples phosphates de chaux qu'on observe dans cette craie, mais bien des phosphates fluorés. Le fluorure de calcium a dû être emprunté aux eaux de la mer et sa fixation sur le phosphate de chaux a pu s'opérer dans la même période de temps que la fixation du phosphate de chaux sur les restes organiques ; mais elle a pu aussi se continuer pendant un temps plus long. Elle devait avoir pour terme moyen la formation d'un composé voisin du fluophosphate normal ou apatite ; mais ce degré de fluoration pouvait, comme nous l'avons expliqué plus haut, se trouver parfois un peu dépassé, dans l'ensemble du minerai, par suite de la formation de fluorure de calcium à côté du fluophosphate. L'analyse des phosphates de la craie montre, en effet, que la teneur en fluor est assez seuvent supérieure à celle de l'apatite.

1° *Sables phosphatés.* — J'ai trouvé les résultats suivants pour l'analyse élémentaire et la composition calculée d'un phosphate sableux (LXXVI) exploité à Noeux, canton d'Auxy-le-Château, arrondissement de Saint-Pol (Pas-de-Calais).

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique .. | 28,43 | $Ca^3P^2O^8$ ..... | 62,06 |
| Acide carbonique .... | 4,18 | $CaFl^2$ ..... | 6,16 |
| Ac. sulfurique, chlore. | traces | $CaCO^3$ ..... | 7,68 |
| Fluor ..... | 2,93 | $MqCO^3$ ..... | 1,53 |
| Chaux ..... | 42,47 | $Al^2O^3$, $Fe^2O^3$ ..... | 6,11 |
| Magnésie ..... | 0,73 | $SiO^2$, argile ..... | 9,73 |
| Oxyde de fer, alumine. | 6,11 | Eau, mat. org. ..... | 6,10 |
| Argile, silice ..... | 9,73 | | 99,37 |
| Perte au feu ..... | 6,10 | | |
| | 100,68 | | |

On a donc, pour la relation de l'acide phosphorique et

du fluor :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXXVI..... | 28,32 | 2,93 | 2,53 | 1,16 |

D'autres essais ont donné :

Sur un phosphate gris de Buire-au-Bois, canton d'Auxy-le-Château (Pas-de-Calais) :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| LXXVII..... | 29,02 | 3,07 | 2,59 | 1,19 |

Sur des sables gris de Beauval, arrondissement de Doullens (Somme) :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| LXXVIII..... | 37,20 | 3,26 | 3,22 | 0,98 |
| LXXIX..... | 34,90 | 2,87 | 3,12 | 0,92 |

J'emprunte à M. H. Lasne (*) les analyses suivantes qui se rapportent à :

(LXXX) phosphate riche de Beauval (Somme);

(LXXXI) phosphate riche d'Orville (Pas-de-Calais);

(LXXXII) phosphate pauvre d'Orville, enrichi par lévigation.

| | LXXX | LXXXI | LXXXII |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique..... | 38,76 | 38,25 | 33,01 |
| Acide carbonique..... | 1,56 | 2,43 | 2,75 |
| Acide sulfurique..... | 0,32 | 0,21 | 0,82 |
| Chaux..... | 48,26 | 47,71 | 42,00 |
| Magnésie..... | 0,06 | 0,22 | 0,50 |
| Alumine..... | 0,22 | 0,13 | 0,29 |
| Sesquioxyde de fer..... | 0,47 | 1,08 | 1,98 |
| Fluorure de calcium..... | 6,95 | 6,85 | 6,40 |
| Résidu insoluble..... | 1,26 | 1,50 | 7,12 |
| Eau et matière organique ... | 2,42 | 1,67 | 4,87 |
| | 100,38 | 100,14 | 99,74 |

(*) *Bul. de la Société géologique de France*, 1890, p. 454.



On tire de là :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXXX..... | 38,76 | 3,38 | 3,45 | 0,98 |
| LXXXI..... | 38,25 | 3,33 | 3,41 | 0,97 |
| LXXXII..... | 33,01 | 3,11 | 2,94 | 1,06 |

2° *Produits extraits à Ciply* (Hainaut). — Pour le gite de Ciply, ne possédant pas d'analyse complète, qui fasse connaitre avec exactitude la proportion de fluor, je donnerai seulement à titre d'indication les résultats consignés dans l'important article de M. Nivoit sur les gisements de phosphates (*).

LXXXIII. — Phosphate riche, de couleur châtain, en poudre grenue, faiblement agglomérée (Analyse de M. Petermann).

LXXXIV. — Craie brune de Ciply (Analyse de M. Nivoit).

LXXXV. — Nodules du poudingue de la Malogne (Analyse de M. Nivoit).

| | LXXXIII | LXXXIV | LXXXV |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique ..... | 27,79 | 11,66 | 22,48 |
| Acide carbonique ..... | 5,06 | 28,10 | 18,61 |
| Acide sulfurique ..... | 1,18 | 0,89 | 1,36 |
| Chaux..... | 41,72 | 53,24 | 51,22 |
| Magnésie ..... | 0,84 | 0,12 | 1,30 |
| Potasse ..... | 1,00 | 0,19 | 0,21 |
| Soude ..... | 1,13 | | 0,53 |
| Alumine et oxyde de fer.... | 3,96 | 1,01 | 2,56 |
| Sable, silice et argile ..... | 10,68 | 1,96 | 1,36 |
| Matières organiques azotées . | 5,21 | 2,83 | 0,37 |
| Fluor et perte ..... | 1,43 | | |
| | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Enfin, je mentionnerai un essai que j'ai fait spéciale-

(*) *Encyclopédie chimique*, t. V, 1re section, 2e partie, p. 114.

ment au point de vue de l'acide phosphorique et du fluor sur une craie phosphatée à grains brunâtres appartenant au niveau de la craie de Ciply.

| | $P^2O^5$ | $\frac{P^2O^5}{Fl}$ | Fl | $\frac{Fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXXXVI..... | 12,80 | 1,08 | 1,15 | 0,94 |

On voit que, d'une façon générale, les phosphates de la craie sénonienne ont une composition qui les rapproche beaucoup des apatites, en même temps que, sous les nicols croisés du microscope polarisant, ils présentent, comme elles, le caractère de la croix noire.

### Terrain éocène (Algérie et Tunisie).

Les gîtes de phosphates sédimentaires reconnus depuis quelques années en Algérie et en Tunisie appartiennent à l'Eocène inférieur ou Suessonien.

Les vaillants explorateurs, qui ont débrouillé la constitution géologique du nord de l'Afrique, ont reconnu, entre la mer et le Sahara, deux bandes phosphatées très étendues, l'une qui traverse le sud du Tell et quelques hauts plateaux, l'autre dans la région de l'Aurès, de Tebessa et de Gafsa : ces deux bandes se relient, d'ailleurs, entre elles par quelques témoins reconnus sur les Hauts-Plateaux. Elles marquent les rivages de la mer suessonienne, qui paraît s'être avancée encore bien plus au sud ; car Tissot et MM. Thomas, Pomel et Rolland ont retrouvé des lambeaux de formations suessoniennes au-delà de l'Atlas saharien.

C'est à M. Philippe Thomas que l'on doit les premières découvertes de gisements de phosphate de chaux en Algérie et en Tunisie.

Dès 1873 il avait reconnu l'existence d'une zone phosphatée dans l'étage suessonien de la province d'Alger, notamment près de Boghari, sur la rive droite de la haute vallée du Cheliff ; mais l'importance de cette découverte pour la région algérienne ne lui apparut véritablement que plus tard (*), lorsque, poursuivant ses explorations en Tunisie, il trouva dans le sud de la Régence, en 1885, les grands gisements phosphatés de Gafsa, occupant la même place que la zone de Boghari, mais avec un développement beaucoup plus considérable, à la base des assises de l'éocène.



Dans le mémoire qu'il a consacré à la description des « gisements de phosphate de chaux des hauts plateaux de la Tunisie » (**), M. Thomas rappelle ce qu'avait écrit, en 1878, l'Ingénieur des Mines Tissot, mort trop tôt pour avoir pu réaliser ses projets : « La relation constante du terrain suessonien avec les régions fertiles en céréales, disait Tissot (***), permet de penser que le phosphate de chaux y existe. La structure y est, d'ailleurs, fréquemment noduleuse. Des recherches seront faites à ce point de vue. On parviendra peut-être à trouver là un élément de trafic important, soit pour l'exportation, soit pour fertiliser certaines régions, qui, comme la plaine de Bône, sont connues pour leur peu d'aptitude à donner des céréales... »

Les vues théoriques de Tissot au sujet des phosphates éocènes ont trouvé leur première confirmation dans la Tunisie, cet ancien grenier de Rome, grâce aux patientes recherches et aux heureuses découvertes de M. Ph. Thomas et de ses émules. Il n'est que juste de rappeler ici les belles études de Coquand et de MM. Pomel et Pouyanne, qui ont fait connaître l'éocène algérien, les récentes explo-

(*) *Comptes Rendus*, 30 janvier 1888.
(**) *Bull. de la Soc. géol.*, 1891, p. 370.
(***) *Notice géologique sur le département de Constantine* : Exposition universelle de 1878, p. 35.

rations de M. Ficheur dans la province d'Alger, celles de M. Blayac dans la province de Constantine, celles de M. Aubert en Tunisie, etc.

### 1° Gîtes tunisiens.

Les caractères principaux de l'horizon phosphaté, en Tunisie, peuvent être définis en peu de lignes, d'après les descriptions de M. Thomas.

Sur les différents étages de la craie, qui forment l'ossature centrale des chaînes de montagnes, se sont déposés des limons argileux noirs, saturés de sel gemme et de gypse, comblant les bas-fonds de la mer suessonienne. Les *marnes noires* de la base s'entremêlent plus haut de bancs minces de *calcaires marneux* bruns ou blanchâtres, qui, peu à peu, font place à des bancs plus épais et fossilifères, où l'on trouve assez souvent de la silice, soit diffusée, soit en nodules à patine blanchâtre. Puis, se développent les *marnes* et les *calcaires phosphatés*, dont la puissance est assez constante pour une même chaîne de montagnes, mais variable d'une chaîne à l'autre.

Le niveau phosphaté est recouvert par des bancs puissants de *calcaire à lumachelles*, principalement formés par l'*Ostrea multicostata* et ses variétés, ou par des *calcaires jaunâtres* à gros rognons de *silex noirs*. Dans le sud, ces couches sont très fréquemment redressées et forment de hautes murailles, souvent presque verticales, qui enchâssent les bancs phosphatés, beaucoup plus entamés par les érosions atmosphériques. Dans la région nord des hauts plateaux tunisiens, les calcaires à lumachelles ostréennes sont remplacés par d'énormes tables de *calcaire* un peu cristallin et pétri de Nummulites, dont l'épaisseur peut atteindre 60 mètres et qui constituent des



massifs pittoresques, présentant à l'horizon des escarpements à pic (*Dir* ou *Kifâne*) et parfois des formes de châteaux (*Kalaa* ou *Guelaat*).

Les couches phosphatées comprennent toujours des calcaires, et, alternant avec eux, des marnes brunes, généralement feuilletées et gypsifères; mais les calcaires sont à la fois plus développés que les marnes et plus riches en acide phosphorique.

Les marnes renferment une multitude de débris de sauriens et de poissons, ossements, dents, écailles et petits coprolithes; M. Thomas y a, de plus, remarqué la présence d'une matière organique de consistance grasse et onctueuse, mais qui n'est soluble ni dans la benzine, ni dans le sulfure de carbone, et dont la proportion peut aller jusqu'à 7 ou 8 p. 100. On y trouve aussi des couches irrégulières de nodules, à surface lisse, quelquefois striée, recouverts d'une patine noire et luisante. Les plus volumineux, dont la grosseur atteint celle d'un melon, sont entièrement calcaires à l'intérieur ; le phosphate, accumulé à la surface, constitue à peine 5 ou 6 p. 100 de la masse. Au contraire, les petits nodules, et, en particulier, les véritables coprolithes, qui sont cylindriques, bruns et recouverts aussi d'une patine luisante, contiennent jusqu'à 70 p. 100 de phosphate (*). Les marnes ne contiennent pas de grains glauconieux, contrairement à ce qui a lieu pour les calcaires, mais elles montrent souvent des filets interstratifiés de gypse cristallin, des nodules de strontiane sulfatée et des sels alcalins, qui se révèlent par des efflorescences naturelles blanches.

Les calcaires phosphatés, alternant avec les marnes brunes, ont une coloration qui varie du gris jaunâtre clair au brun verdâtre ; ils sont légers, grenus et peu consistants. Le poids spécifique de la roche dépasse rarement 2;

(*) Analyse du Bureau d'essai de l'École des Mines du 19 octobre 1885.

elle est souvent assez friable pour s'écraser entre les doigts.

Elle est formée de petits grains phosphatés à patine brune et brillante et d'écailles vertes nombreuses ressemblant à certaines glauconies, le tout plus ou moins aggluliné par un ciment calcaire, qui lui donne, lorsqu'il est abondant, l'aspect de la craie grise ou du tuffeau de Ciply. On y trouve aussi de très petits grains anguleux de quartz et une proportion notable de silice hydratée, soluble aux alcalis, enfin une quantité très grande de débris organiques, tels que dents, ossements et coprolithes, comme dans les marnes feuilletées.

Nous ne nous occuperons pas des gites crétacés, dont les uns appartiennent à l'étage du gault, les autres à l'étage sénonien, aucun d'eux ne paraissant susceptible d'exploitation dans les circonstances actuelles.

Les gites situés à la base des terrains éocènes, dans l'étage suessonien, sont, au contraire, certainement appelés à prendre une place très importante dans la production des engrais minéraux, lorsque l'existence de voies ferrées, les reliant à la mer, permettra l'exportation de leurs produits en Europe.

C'est dans le sud-ouest de la Régence que se trouvent les amas de phosphates les plus étendus et les plus riches.

Il faut citer en première ligne ceux qui bordent la chaine montagneuse du Djebel-Tseldja, située à l'ouest de Gafsa, chaîne qui doit son relief à un plissement du terrain crétacé, tandis que les couches éocènes, qui le recouvraient, se sont rompues et redressées presque verticalement au nord et au sud de la crête centrale. Ces gites ont été découverts par M. Thomas. M. Mercier, contrôleur du service des Mines de la Régence, a constaté qu'ils s'étendent, presque sans aucune interruption, sur tout le versand sud de la chaîne, entre le Djebel-Stah et l'oasis de Chebika, sur plus de 50 kilomètres de longueur et avec



une puissance continue de 50 à 60 mètres. Il a constaté aussi que leur teneur naturelle et leur état sableux permettent de les amener aisément, par lavage, à contenir plus de 62 p. 100 de phosphate tribasique.

Sur le seul versant méridional de la chaine, qui est d'ailleurs la zone la plus importante, le cubage du minerai en vue, estimé à son minimum, a indiqué plus de 3 millions de mètres cubes, correspondant à plus de 5 millions de tonnes de phosphate enrichi par lavage. Encore n'a-t-on tenu compte, dans cette évaluation, ni des marnes phosphatées, ni des portions calcaires où la teneur brute a été trouvée inférieure à 52 p. 100 de tribasique et qui ne sont pas jugées exploitables pour le moment.

Les autres gites tunisiens reconnus les plus dignes d'attention sont les suivants :

1° Ceux du Khanguet Jellabia et du Djebel-Sehib, à 30 ou 40 kilomètres au sud du Tseldja et de Gafsa ;

2° Ceux du Djebel-Nasser-Allah, au sud-ouest de Kairouan, qui s'étendent sur une longueur de 30 kilomètres environ, en formant deux bandes parallèles dirigées à peu près nord-sud ; la teneur brute des phosphates ne dépasse pas 45 p. 100, mais ils se prêtent bien à l'enrichissement par lavage et la proximité relative de la mer, par Kairouan et Sousse, devra faciliter leur exploitation ;

3° Ceux de la région comprise entre Tebessa et Tunis, notamment d'Haydra, de Thala et de Guelaat-es-Senam (*). Dans ce dernier, les marnes et le calcaire blanc à phosphate sont recouverts par un calcaire blanc à gastropodes et celui-ci par un calcaire dur, avec Nummulites extrêmement nombreuses et *Ostrea multicostata* à la partie supérieure. Ce calcaire Nummulitique forme une immense table, ayant la forme d'un rectangle à pans cou-

(*) Thomas, *Bull. de la Société géol.*, 1891.

pés verticalement, d'une hauteur de plus de 50 mètres, justifiant bien le nom de Guelaat (château, falaise).

4° D'autres gîtes se trouvent en assez grand nombre au Nord-Est des précédents et sont, comme eux, recouverts par des plateaux nummulitiques; mentionnons, parmi eux, les gites de Sidi-Ayet, situés dans la vallée de l'Oued-Siliana, à 55 kilomètres environ du chemin de fer de Tunis à Ghardimaou (*), gites assez étendus, dans lesquels on a trouvé des couches de phosphate à la teneur moyenne de 50 p. 100 et des nodules, faciles à séparer de la gangue, à la teneur de 70 p. 100.

5° Les gisements situés dans les régions de Kef et de Teboursouk, sur la rive droite de la Medjerdah, dans les régions de Ghardimaou et de Béja, sur la rive gauche, offrent une grande étendue; mais leur importance industrielle n'a pas encore été déterminée d'une façon précise.

M. Levat, revenant d'un voyage en Tunisie, dont il a rendu compte dans son mémoire sur l'*Industrie des phosphates*, m'a remis un échantillon de phosphate de Gafsa, considéré comme type des minerais de ce gisement. Cet échantillon gris, terreux, très friable, a présenté la composition suivante (LXXXVII) :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique. . | 31,73 | $Ca^3P^2O^8$ . . . . . | 66,52 |
| Acide carbonique. . . | 7,46 | $(Al^2, Fe^2)\ P^2O^8$ . . . . | 2,50 |
| Ac. sulfurique, chlore. | traces | $CaFl^2$ . . . . . | 6,50 |
| Fluor . . . . . | 3,17 | $CaCO^3$ . . . . . | 15,53 |
| Chaux. . . . . | 49,30 | $MgCO^3$. . . . . | 1,20 |
| Magnésie. . . . . | 0,57 | $SiO^2$, argile. . . . . | 2,25 |
| Alumine et peroxyde | | Eau, mat. org . . . . | 4,85 |
| de fer . . . . . | 1,25 | | 99,45 |
| Silice et argile . . . . | 2,35 | | |
| Eau et matière organique . . . . . | 4,85 | | |
| | 100,68 | | |

(*) David Levat, Etude sur l'industrie des phosphates ; *Annales des Mines*, 1895, 1er semestre.



On tire de là :

| | $P^2O^5$ | $\frac{P^2O^5}{Fl}$ | Fl | $\frac{P^2O^5}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| LXXXVII ..... | 31,73 | 3,17 | 2,83 | 1,12 |

Un autre échantillon de Gafsa a donné à l'essai :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| LXXXVIII ..... | 31,20 | 2,72 | 2,78 | 0,98 |

Deux échantillons de nodules du gisement de Sidi-Ayet, envoyés par M. Cucherat, ont donné à l'essai :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| LXXXIX ..... | 31,90 | 3,25 | 2,84 | 1,14 |
| XC..... | 34,82 | 3,78 | 3,00 | 1,26 |

**2° Gites algériens.**

Les gisements phosphatés de l'Algérie, appartenant à l'Eocène inférieur, se relient sans discontinuité aux gisements de la Tunisie; on les retrouve au sud, près de ceux du Djebel Tseldja; au centre, près de Tebessa, faisant suite à ceux de Guelaat-es-Senam; au nord, près de Soukahras, à la suite de ceux de Béja et de Ghardimaou, dans la partie haute de la vallée de la Medjerdah. Ces derniers se poursuivent du côté de Constantine, de Sétif, de Fakroun, à Bou-Arreridj, à M'Sila et à Birin, au sud de Boghari, dans le sud de la province d'Alger.

Les régions situées plus loin vers l'ouest paraissent ne renfermer que des phosphates pauvres, en dehors des grottes à phosphorites, nombreuses dans la vallée du Cheliff, vers la hauteur de Mostaganem, qui appartiennent, ainsi que nous l'avons vu, à une toute autre formation.

La constitution pétrographique du Suessonien est des plus régulières dans le Tell (*).

(*) M. Blayac, *Annales des Mines*, 1894 et 1895; — et *C. R. des séances de la Société géologique de France*, 18 nov. 1895.

A la base se trouvent des *Marnes noires*, à *Ostrea multicostata*, *O. eversa*, *O. strictiplicata*, etc., quelquefois remplacées par des argiles noires glauconieuses sans fossiles.

Puis viennent des *calcaires tendres* en plaques, alternant avec des *lits de silex* et renfermant souvent trois ou quatre *bancs de phosphates*, dont les plus importants peuvent avoir depuis $0^m,60$ jusqu'à 2 mètres d'épaisseur et les plus minces de $0^m,20$ à $0^m,40$.

Au-dessus sont des *calcaires durs*, un peu cristallins, à Nummulites et Thersitées (*Ostrea multicostata*, *Nummulites planulata*, *N. Rollandi*, *Thersitea ponderosa*, etc.).

Les deux dernières assises paraissent se développer quelquefois l'une aux dépens de l'autre. Vers l'ouest, les calcaires cristallins à Nummulites atteignent 400 et 500 mètres d'épaisseur, tandis que les marnes phosphatées semblent s'atrophier ; mais vers l'est, au contraire, on peut suivre ces marnes jusqu'au voisinage de la mer, comme au Djebel Nasser-Allah, en Tunisie (*).

---

Les gîtes phosphatés des environs de *Tebessa* (province de Constantine) ont été décrits en détail par M. Blayac (**). Je me bornerai à rappeler ici qu'ils présentent la succession des trois étages déjà indiqués : des marnes noires à la base, puis des alternances de calcaires tendres avec des lits de silex et avec des bancs de phosphates, enfin des calcaires cristallins durs à Nummulites, dont l'épaisseur atteint de 120 à 150 mètres.

Les phosphates sont généralement friables et de couleur grise.

L'épaisseur des bancs de phosphates exploités varie

(*) M. Ph. Thomas. *Soc. géol. de Fr.*, 18 nov. 1895.
(**) *Annales des Mines*, 1894, 2e semestre, p. 319.



depuis 2 ou 3 mètres jusqu'à 6 mètres. Le minerai, généralement friable comme celui de Gafsa, est, après triage sur place, réparti pour la vente en deux catégories, la plus pauvre tenant de 58 à 63 p. 100 de phosphate tribasique, la plus riche avec une teneur de 63 à 69 p. 100.

L'exploitation de ces phosphates, qui n'a commencé qu'en 1895, est actuellement aux mains de trois compagnies, désignées sous les noms de : C^ie Crokston, C^ie Jacobsen et C^ie Française. La première exploite souterrainement et les deux autres jusqu'ici à ciel découvert.

Je dois à l'obligeance de MM. Blayac et Ficheur des échantillons provenant des principaux centres d'exploitation ; je vais donner quelques exemples d'analyses complètes de ces phosphates.

(XCI) Échantillon du Djebel Dyr (exploitation de la Compagnie Crokston) :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique.. | 33,67 | $Ca^3P^2O^8$ ..... | 73,52 |
| Acide sulfurique..... | 1,40 | $CaFl^2$ ..... | 5,03 |
| Acide carbonique.... | 5,00 | $CaSO^4$ ..... | 2,38 |
| Fluor ..... | 2,45 | $CaCO^3$ ..... | 10,34 |
| Chlore ..... | tr. | $MgCO^3$ ..... | 0,84 |
| Chaux ..... | 50,55 | $Al^2O^3,Fe^2O^3$ ..... | 1,70 |
| Magnésie..... | 0,40 | $SiO^2$ ..... | 0,40 |
| Alumine, oxyde de fer. | 1,70 | Eau, mat. org..... | 6,07 |
| Silice..... | 0,40 | | 100,28 |
| Perte au feu..... | 6,07 | | |
| | 101,64 | | |

(XCII) Échantillon de Chabet el Ouissen (exploitation de la Société française des phosphates de Tebessa).

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acide phosphorique.. | 32,57 | $Ca^3P^2O^8$ | 71,11 |
| Acide sulfurique..... | 1,20 | $CaFl^2$ | 5,35 |
| Acide carbonique .... | 6,41 | $CaSO^4$ | 2,04 |
| Fluor..... | 2,61 | $CaCO^3$ | 13,40 |
| Chlore..... | tr. | $MgCO^3$ | 0,99 |
| Chaux..... | 51,09 | $Al^2O^3,Fe^2O^3$ | 2,15 |
| Magnésie..... | 0,47 | $SiO^2$ | 0,72 |
| Alumine,oxyde de fer. | 2,15 | Eau, mat. org..... | 4,50 |
| Silice..... | 0,72 | | 100,26 |
| Perte au feu..... | 4,50 | | |
| | 101,72 | | |

(XCIII) Échantillon de l'exploitation récemment ouverte à Aïn-Dibba, à 8 kilomètres de Kissa, par la Société française ; deux bancs horizontaux, séparés par une intercalation calcaire de $0^m,50$ environ, sont recouverts de 120 à 150 mètres d'épaisseur de calcaire cristallin à Nummulites. L'échantillon appartient au banc supérieur, le plus riche et le plus friable :

| | | | |
|---|---|---|---|
| $P^2O^5$..... | 32,22 | $Ca^3P^2O^8$..... | 70,34 |
| $SO^3$..... | 1,54 | $CaFl^2$..... | 5,74 |
| $CO^2$..... | 6,15 | $CaSO^4$..... | 2,62 |
| Fl..... | 2,80 | $CaCO^3$..... | 12,78 |
| Cl..... | tr. | $MgCo^3$..... | 1,00 |
| CaO..... | 50,71 | $Al^2O^3,Fe^2O^3$..... | 1,95 |
| MgO..... | 0,48 | $SiO^2$..... | 0,87 |
| $Al^2O^3,Fe^2O^3$..... | 1,95 | Eau, mat. org..... | 4,36 |
| $SiO^2$..... | 0,87 | | 99,66 |
| Perte au feu..... | 4,36 | | |
| | 101,08 | | |

Au point de vue du rapport entre l'acide phosphorique et le fluor, on a les résultats suivants :

| | | $P^2O^5$ | // | Fl | $\frac{//}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| XCI | Djebel Dyr..... | 33,67 | 2,45 | 3,00 | 0,82 |
| XCII | Chabet el Ouissen. | 32,57 | 2,61 | 2,90 | 0,90 |
| XCIII | Aïn Dibba..... | 32,20 | 2,80 | 2,87 | 0,97 |



L'essai spécial sur quelques autres échantillons a donné :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| XCIV | Djebel Kouif..... | 26,70 | 2,65 | 2,38 | 1,11 |
| XCV | Maïziba..... | 31,90 | 2,62 | 2,84 | 0,92 |
| XCVI | Aïn Dibba..... | 31.60 | 2,58 | 2,81 | 0,92 |
| XCVII | *Id.* | 15,30 | 1,28 | 1,36 | 0,93 |

M. Blayac m'a fait parvenir quelques échantillons appartenant à d'autres gites situés dans la région de Constantine et désignés sous les noms d'Aïn Fakroum, Sigus et Oum el Abeïr.

Le premier appartient à un lambeau suessonien de 4 à 5 kilomètres de long, situé à quelques kilomètres de distance du village français d'*Aïn Fakroum*, sur le flanc ouest du massif des Chebka-Mta-Sellaoua. Il est intercalé entre les calcaires à Inocérames (Sénonien supérieur) et des formations gréso-calcaires très épaisses (probablement helvétiennes) qui constituent la crête principale de cette longue chaine des Chebka. Les phosphates forment trois ou quatre bancs de $0^m,60$ à $1^m,10$ d'épaisseur, intercalés, ainsi que des lits de silex, dans les calcaires en plaques tendres, qui ont de 20 à 30 mètres d'épaisseur et qui, reposant sur 10 à 15 mètres de marnes noires, sont eux-mêmes recouverts par une dizaine de mètres de calcaires durs nummulitiques.

Deux échantillons, l'un siliceux à 27 p. 100, l'autre à 5 p. 100 de quartz, ont donné à l'essai :

| | $P^2O^5$ | // | Fl | $\frac{Fl}{//}$ |
|---|---|---|---|---|
| XCVIII... | 20,21 | 1,44 | 1,80 | 0,80 |
| XCIX.... | 19,83 | 1,36 | 1,76 | 0,77 |

Le bassin suessonien de *Sigus* présente les mêmes divisions ; mais les marnes noires de la base sont peu épaisses et l'assise des calcaires tendres à silex prend au contraire un grand développement et comprend des bancs marneux

et des bancs phosphatés en grand nombre ; mais la plupart sont peu riches et ne peuvent guère être exploités que pour la culture locale ; seuls, les bancs les plus élevés, dont l'épaisseur ne dépasse pas 0m,60, atteignent une teneur de 24 à 25 p. 100 d'acide phosphorique. Les calcaires cristallins formant l'assise supérieure du suessonien sont entremêlés de bancs de silex et de marnes.

Deux échantillons des phosphates de Sigus ont donné :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | $Fl$ | $\frac{Fl}{fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| C..... | 16,63 | 1,40 | 1,48 | 0,94 |
| CI..... | 23,98 | 2,04 | 2,14 | 0,95 |

Le gisement d'*Oum el Abeïr* se trouve encore dans la province de Constantine, un peu plus au sud que les deux précédents. Il est compris dans un étage formé d'énormes bancs gréso-calcaires et de marnes peu épaisses, qui forme les grandes crêtes de la chaine des Chebka-Mta-Sellaoua, entre les deux immenses plaines de Temlouka et des Harectas. D'après M. Blayac, qui en a commencé l'étude, le niveau de cette formation ne serait pas encore parfaitement déterminé et paraîtrait plus élevé que celui des gites précédents. Le phosphate présente les mêmes caractères que celui d'Aïn-Fakroum, mais il est pauvre et souvent mêlé à de grosses lentilles calcaires.

L'essai de deux échantillons de ce gite a donné :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | $Fl$ | $\frac{Fl}{fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| CII..... | 14,07 | 1,21 | 1,25 | 0,96 |
| CIII ..... | 13,10 | 1,12 | 1,16 | 0,97 |

Un autre district, qui fait l'objet d'actives recherches pour phosphates, se trouve vers le sud-ouest de la province de Constantine ; il comprend les gîtes de Bordj-bou-Arreridj et ceux de M'Sila, M'Zeïta et Bordj R'dir.

La constitution géologique de l'étage suessonien est la



même dans cette région que dans celles de l'Est : marnes noires à la base, calcaires tendres en plaques avec lits de silex noirs et bancs de phosphates, enfin, par dessus, calcaires durs un peu cristallins.

Les couches sénoniennes de *M'Sila* (*) s'étendent sur le versant sud du Djebel Mahdid, reposant sur le sénonien avec une inclinaison de 20 à 30° vers le sud et formant une longue bande de 70 kilomètres environ.

Il existe, à la partie supérieure des calcaires tendres, deux bancs de phosphates de 1m,10 et 0m,80 et, dans la partie inférieure, plusieurs autres bancs plus minces, de 0m,20 à 0m,40, de teneurs plus faibles.

Les deux bancs supérieurs sont représentés par les échantillons CIV et CV, qui sont noirs, piquetés de blanc, durs et très siliceux (33,1 et 30,6 de silice) ; l'échantillon CVI, beaucoup moins siliceux (12,1 p. 100) et de teneur faible, est pris sur un banc de 0m,30 d'épaisseur.

| | $P^2O^5$ | $fl$ | $Fl$ | $\frac{Fl}{fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| CIV..... | 21,75 | 1,67 | 1,94 | 0,86 |
| CV..... | 22,71 | 1,78 | 2,02 | 0,88 |
| CVI ..... | 13,75 | 1,02 | 1,23 | 0,84 |

Le *Djebel M'Zeïta*, situé au nord du M'Sila, présente une succession de couches analogues.

Je dois à M. Jacob, ingénieur des Mines à Constantine, une série d'échantillons de ce gite, sur lequel il venait de faire exécuter un grand nombre de sondages, afin d'en déterminer l'importance. Ce gite est situé à 30 kilomètres environ au Sud du gîte déjà connu de Bordj-bou-Arreridj.

Parmi les échantillons essayés pour acide phosphorique, j'en ai choisi deux représentant des types très différents, l'un riche, l'autre pauvre et magnésien, dont j'ai fait

(*) D'après les indications de M. Blayac, qui m'a fait parvenir les échantillons.

l'analyse complète :

| | CVII | CVIII | | CVII | CVIII |
|---|---|---|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 35,10 | 10,24 | $Ca^3P^2O^8$ | 76,63 | 22,35 |
| $CO^2$ | 2,50 | 30,06 | $CaFl^2$ | 6,26 | 2,05 |
| $SO^3$ | tr. | tr. | $CaCl^2$ | 0,20 | tr. |
| Fl | 3,05 | 0,99 | $CaSO^4$ | tr. | tr. |
| Cl | 0,12 | tr. | $CaCO^3$ | 5,15 | 45,07 |
| CaO | 48,91 | 38,77 | $MgCO^3$ | 0,45 | 19,53 |
| MgO | 0,22 | 9,30 | $Fe^2O^3$ | 1,37 | 1,32 |
| $Fe^2O^3$ | 1,37 | 1,32 | Quartz, argile | 7,20 | 6,68 |
| Quartz, argile | 7,20 | 6,68 | Eau, mat. org. | 2,75 | 2,90 |
| Perte au feu | 2,73 | 2,90 | | 99,99 | 99,90 |
| | 101,20 | 100,26 | | | |

En relevant les proportions d'acide phosphorique et de fluor on trouve :

| | $P^2O^5$ | $\mathit{fl}$ | Fl | $\frac{Fl}{\mathit{fl}}$ |
|---|---|---|---|---|
| CVII | 35,10 | 3,11 | 3,13 | 0,99 |
| CVIII | 10,24 | 0,99 | 0,91 | 1,08 |

Le gisement de *Bordj R'dir*, situé entre M'Sila et M'Zeïta, renferme des couches de phosphate de $1^m,20$ à $1^m,50$ d'épaisseur. M. Pfeffel, qui dirige les recherches, m'en a adressé une série nombreuse d'échantillons, généralement assez durs et siliceux, dont la teneur en acide phosphorique, le plus souvent comprise entre 25 et 30 p. 100, s'élevait parfois jusqu'à 36 p. 100.

L'analyse complète de deux échantillons a donné :

| | CIX | CX | | CIX | CX |
|---|---|---|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 25,70 | 24,25 | $Ca^3P^2O^8$ | 56,10 | 52,94 |
| $SO^3$ | 2,37 | 3,10 | $CaFl^2$ | 4,27 | 4,12 |
| $CO^2$ | 8,06 | 7,26 | $CaSO^4$ | 4,03 | 5,27 |
| Fl | 2,08 | 2,01 | $CaCO^3$ | 14,34 | 14,63 |
| Cl | tr. | tr. | $MgCO^3$ | 2,05 | 1,57 |
| CaO | 42,71 | 42,00 | $Al^2O^3,Fe^2O^3$ | 3,25 | 9,75 |
| MgO | 0,95 | 0,75 | $SiO^2$ | 9,94 | 7,21 |
| $Al^2O^3,Fe^2O^3$ | 3,25 | 9,75 | Eau, mat. org. | 5,95 | 4,90 |
| $SiO^2$ | 9,94 | 7,21 | | 99,93 | 100,39 |
| Perte au feu | 5,95 | 4,90 | | | |
| | 101,01 | 101,23 | | | |



Les nombres relatifs à l'acide phosphorique et au fluor sont :

| | $P^2O^5$ | $\mathit{fl}$ | Fl | $\frac{\mathit{fl}}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| CIX | 25,70 | 2,08 | 2,29 | 0,91 |
| CX | 24,25 | 2,01 | 2,16 | 0,93 |

Enfin, si l'on continue à s'avancer vers l'Ouest, on trouve, à la limite du Tell et de la région des hauts plateaux de la province d'Alger, une large bande suessonienne qui s'étend entre *Boghari* et *Sidi-Aïssa*. Le suessonien supérieur, présentant 100 à 150 mètres d'épaisseur de grès et de marnes, recouvre sur presque toute son étendue le suessonien inférieur, composé, comme dans les environs de Tebessa, de marnes noires, de calcaires tendres à silex et de calcaires cristallins à Nummulites ; mais ces derniers, qui atteignent 100 à 150 mètres d'épaisseur, montrent vers l'Ouest des intercalations gréso-calcaires.

Les bancs de phosphates sont toujours dans la zone des calcaires tendres à silex et presque horizontaux ; deux bancs d'environ 1 mètre d'épaisseur ont seuls des teneurs se rapprochant de 20 p. 100 d'acide phosphorique.

Voici les résultats des essais faits sur deux échantillons de phosphates de Boghari :

| | $P^2O^5$ | $\mathit{fl}$ | Fl | $\frac{\mathit{fl}}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| CXI | 17,30 | 1,42 | 1,54 | 0,92 |
| CXII | 17,16 | 1,45 | 1,53 | 0,95 |

Les faits observés dans l'étude des gisements de phosphates de la Tunisie et de l'Algérie permettent de se faire une idée assez précise des conditions où ces gisements se sont formés.

Les sédiments marins, plus ou moins vaseux, qui ont constitué plus tard les bancs de marnes et de calcaires phosphatés, se sont certainement déposés sur des côtes basses, presque plates, ou dans des lagunes ; on trouve

dans les bancs calcaires des genres de mollusques tels que Cérithes, Turritelles, Ostrea, attestant que les eaux où ils ont vécu avaient peu de profondeur ; mais ces fossiles eux-mêmes deviennent beaucoup plus rares, lorsque les calcaires sont riches en phosphates, tandis qu'ils contiennent alors une énorme quantité de débris d'os, de dents et d'écailles, avec de nombreux coprolithes des saurieus qui vivaient sur les rivages de la mer suessonienne. Les phosphates de Gafsa, de Tébessa, de M'Zeïta sont particulièrement riches en débris de ce genre.

Les sédiments encore meubles devaient être fréquemment remaniés par les vagues, qui venaient déferler sur les côtes, comme nous le voyons pour les sables de nos plages actuelles ; mais, sur ces rivages très plats et très étendus, les moindres plis ou ondulations de terrains pouvaient modifier les conditions de dépôt ; certaines régions pouvaient se trouver isolées des autres et former des lagunes salées, comparables aux *sebkhas* ou aux *chotts* modernes, dans lesquelles l'eau de la mer n'avait accès qu'à de certains intervalles de temps et où l'eau, isolée comme dans des marais salants, subissait, pendant le reste du jour, une évaporation active et, par suite, une concentration ou même une dessiccation plus ou moins avancée.

La présence d'une masse considérable de débris organiques dans ces eaux devait avoir pour effet de les charger d'acide carbonique et de carbonate d'ammoniaque et, par conséquent, d'augmenter leur puissance de dissolution sur les calcaires et sur les phosphates. La présence de chlorure de sodium devait encore accroître la solubilité des phosphates (*).

(*) D'après les expériences relatées dans le *Traité de chimie géologique* de Bischof, une partie de phosphate de chaux tribasique exige, pour se dissoudre, 5.432 parties d'eau et seulement 3.150 parties de la même eau contenant 1/12 de son poids de chlorure de sodium. Le



Mais lorsque le phosphate, entré ainsi en solution, se trouvait amené au contact d'éléments calcaires, il devait se précipiter à la surface des grains de carbonate de chaux, qui se dissolvaient partiellement. Ainsi s'explique le dépôt superficiel du phosphate mêlé de substance organique, qui enveloppe les grains calcaires et les menus débris d'ossements et qui leur a donné une patine brune et brillante caractéristique. Les blocs ou galets de calcaire, comme il s'en trouve parfois au milieu des grains de phosphates, ont reçu une enveloppe et une patine semblables, mais sans que le phosphate pût pénétrer au-delà de la surface, fait déjà signalé plus haut comme assez fréquent dans les gîtes de Tebessa.

Remarquons enfin que, parmi les sels de la mer, qui devaient se concentrer sur les rivages plats ou dans les lagunes chaque fois que la mer se retirait, parmi ces sels, dis-je, se trouvait du fluorure de calcium, qui devait naturellement, suivant la loi que nous avons observée, se fixer sur les débris d'os, les écailles, les grains phosphatés de toute espèce et les transformer en fluophosphates plus ou moins voisins des apatites. L'expérience nous a montré que cette fixation du fluorure est particulièrement favorisée par la concentration et l'évaporation jusqu'à sec des eaux qui imprègnent les phosphates ; or, ce sont précisément les circonstances qui ont dû se réaliser une infinité de fois sur ces rivages plats, sous l'influence du flux ou du reflux de la mer, pendant la durée de cette époque géologique.

On conçoit aisément que la diversité des conditions géographiques ait pu entrainer les diversités correspondantes dans la composition des phosphates ; que les uns

chlorure d'ammonium a un effet encore plus prononcé. Je puis ajouter, d'après mes propres essais, que le carbonate d'ammoniaque, produit naturel de la décomposition des matières organiques azotées, produit aussi dans le même sens un effet des plus marqués.

aient pu subir une fluoration plus avancée que les autres ; de même, sur certaines plages, il a pu se déposer une plus grande quantité de calcaire ; en d'autres endroits il a pu se produire des dépôts gypseux ; ailleurs, des dépôts siliceux, qui se traduisent, tantôt par de la silice diffusée dans les calcaires marneux, tantôt par des lits de silex en nodules.

La composition des bancs de calcaires phosphatés a pu subir aussi quelques changements postérieurement à leur dépôt et même à celui des couches qui les ont recouverts. Depuis que ces couches, primitivement horizontales, ont été plissées et relevées avec les couches de craie sous-jacentes, les eaux pluviales ont pu, en y pénétrant, donner lieu à de nouveaux phénomènes de dissolution du calcaire, de dissolution et de reprécipitation du phosphate ; le minerai phosphaté a pu devenir ainsi plus sableux et plus riche.

Mais ces actions ont dû être toutes locales et ne sauraient rendre compte que d'une petite partie des modifications physiques et chimiques éprouvées par les sédiments marins. Les transformations principales et, en quelque sorte, définitives ont dû se faire à l'époque même de la formation des sédiments, lorsqu'ils étaient encore baignés par les eaux salées des lagunes.

### Terrains tertiaires aux États-Unis.

La Caroline du Sud et la Floride sont les deux États de l'Amérique, où la production de phosphates minéraux est actuellement la plus considérable.

Celle de la Caroline du Sud a légèrement baissé entre 1890 et 1894, variant de 590.000 à 500.000 tonnes métriques environ ; celle de la Caroline du Nord s'est un peu élevée (9.000 tonnes en 1894). Celle de la Floride a débuté, en 1888, avec 900 tonnes seulement ; elle a passé



à 5.300 tonnes en 1890 et à 440.000 tonnes en 1894, tandis que, dans le même temps, la production des apatites du Canada descendait de 29.000 tonnes en 1890 à 6.600 tonnes seulement en 1894 (*).

#### 1° Gisements de la Caroline du Sud (**).

Les phosphates de la Caroline du Sud paraissent avoir pour origine les calcaires éocènes de Wiscksburg, qui s'étendent presque sans interruption sur toute la côte Est, le long de l'Atlantique. L'action des eaux de surface sur ces calcaires très phosphatés aurait fait disparaître une grande partie du calcaire et les phosphates, enrichis, puis désagrégés par les eaux, auraient été transportés dans un estuaire peu profond, pendant la période miocène, et auraient formé des dépôts où ils seraient restés entremêlés avec des sables et des argiles.

On a signalé, en outre, que de nombreux ossements d'animaux pliocènes et même quaternaires ont été enfouis dans les couches phosphatées et s'y sont eux-mêmes phosphatisés, le carbonate de chaux qu'ils renfermaient ayant été dissous et remplacé par du phosphate de chaux, qui a sensiblement augmenté le poids spécifique et la dureté des ossements fossiles, surtout à la surface.

J'ai soumis à l'analyse deux échantillons, que M. Lequin a eu l'obligeance de me remettre comme types des deux variétés de phosphates de la Caroline connues dans le commerce sous les noms de *Land Rock* et de *Horseshoe*. Le premier (CXIII), Land Rock de la rivière Coosaw, se présente en gros fragments noirs, durs et caverneux, avec parties grises, empreintes de coquilles et surfaces con-

(*) *The mineral Industry for* 1894, Richard Rothwell, New-York.
(**) *The phosphates of America*, Francis Watt, 1891, New-York. — Étude sur l'Industrie des phosphates, David Levat ; *Annales des Mines*, 1895.

crétionnées luisantes. Le second (CXV), Horseshoe, est en masses grises et brunes, avec empreintes nombreuses et couches nettement concrétionnées, de couleurs blanchâtre, grise et brune.

| | CXIII | CXV | | CXIII | CXV |
|---|---|---|---|---|---|
| $P^2O^5$ | 25,14 | 29,74 | $Ca^3P^2O^8$ | 54,86 | 64,92 |
| $SO^3$ | 2,30 | 1,63 | $CaFl^2$ | 4,80 | 5,37 |
| $CO^2$ | 4,34 | 4,90 | $CaCl^2$ | tr. | 0,31 |
| Fl | 2,34 | 2,62 | $CaSO^4$ | 3,91 | 2,77 |
| Cl | tr. | 0,20 | $CaCO^3$ | 9,86 | 10,72 |
| CaO | 40,30 | 46,30 | $MgCO^3$ | tr. | 0,42 |
| MgO | tr. | 0,20 | $Al^2O^3,Fe^2O^3$ | 2,33 | 5,20 |
| $Al^2O^3,Fe^2O^3$ | 2,33 | 5,20 | Insoluble | 15,90 | 5,60 |
| Insoluble | 15,90 | 5,60 | Perte au feu | 7,90 | 4,61 |
| Perte au feu | 7,90 | 4,61 | | 99,56 | 99,92 |
| | 100,55 | 101,00 | | | |

Deux autres échantillons de Land Rock et de Horseshoe ont été essayés au point de vue de l'acide phosphorique et du fluor. Voici les résultats correspondants aux deux variétés de phosphates:

| | | $P^2O^5$ | // | Fl | $\frac{//}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Landrock | CXIII | 25,14 | 2,34 | 2,24 | 1,04 |
| | CXIV | 25,84 | 2,48 | 2,30 | 1,08 |
| Horseshoe | CXV | 29,74 | 2,62 | 2,73 | 0,96 |
| | CXVI | 30,85 | 2,72 | 2,75 | 0,99 |

La composition des phosphates de la Caroline est donc, à en juger par ces quatre échantillons, très voisine de celle des apatites.



### 2° Gisements de la Floride (*).

La plupart des grandes exploitations de phosphates en roche de la Floride se trouvent dans la partie occidentale de la presqu'île, dont le sol, partout à altitude très faible, est constitué par des *calcaires éocènes*. Ces calcaires ont été fissurés par les mouvements du sol et entamés par de puissantes érosions; le phosphate y est en masses irrégulières et sans stratification.

Il existe cependant aussi quelques gites phosphatés dans des terrains plus récents, notamment dans le *calcaire miocène*, qui se montre en couches horizontales, alternant avec des parties plus tendres, souvent marneuses, et supportant un grand nombre d'étangs et de marécages dans le Nord et dans l'Ouest. En divers points, le calcaire a fait place à du phosphate, qui a conservé la structure en bancs horizontaux.

Dans la formation *pliocène*, composée de marnes et d'argiles jaunes ou blanchâtres, on trouve des lits de nodules et de graviers phosphatés, tantôt dans le fond des vallées et des rivières (*river pebble*), tantôt sur de vastes surfaces en dehors de ces vallées (*land pebble*).

On peut enfin signaler l'existence de graviers phosphatés dans des marécages et des lits de rivières, qu'il est naturel de rattacher aux formations modernes. Il y a donc, en réalité, des phosphates dans les différents niveaux géologiques des terrains de la Floride, mais avec des caractères différents, comme le sont les gisements eux-mêmes.

(*) *The phosphates of America*, Francis Watt, 1891, New-York.
*Les phosphates de la Floride*, Ladureau, 1892; *Mémoires de la Société nationale d'Agriculture de France*, t. CXXXV.
Etude sur l'industrie des phosphates, D. Levat; *Annales des Mines*, 1895.
La Floride et ses phosphates, V. Watteyne; *Annales des travaux publics de Belgique*, 1892; et *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1896.

On distingue quatre sortes principales de phosphates, couramment désignées par les dénominations suivantes : Phosphate en roche dure (*Hard rock phosphate*) ; phosphate tendre (*Soft phosphate*) ; nodules de terre (*Land pebble*) ; nodules de rivière (*River pebble*).

1° *Phosphate en roche.* — Le *Rock phosphate* que E.-T. Cox a proposé d'appeler la *Floridite*, présente les caractères généraux des phosphates concrétionnés, mais avec de grandes variétés d'aspect.

Il est ordinairement blanc, blanc laiteux ou blanc jaunâtre, plus rarement coloré en brun ou en gris, de teinte rarement uniforme; il est souvent zoné et présente des cavités irrégulières à surfaces mamelonnées. Certaines parties sont très compactes, laiteuses, à cassure conchoïdale, difficiles à rayer au canif; d'autres sont terreuses et tendres comme de la craie.

Une variété du rock phosphate se trouve en plaques de 1 à 3 ou 4 centimètres d'épaisseur, généralement jaunâtres et dures; on le nomme phosphate en roche plate (*Plate rock*). Souvent plusieurs plaques sont superposées, mais séparées les unes des autres par de petits lits sableux ou argileux, qui témoignent d'interruptions survenues dans le dépôt des concrétions de phosphate.

D'après la description des gîtes, faite par M. Watteyne, « le phosphate en roche forme des poches ou des massifs irréguliers disséminés çà et là dans le terrain et séparés l'un de l'autre par des espaces extrêmement variables, de sorte que, dans la région même qui contient ces massifs, on est exposé à ne rencontrer que du sable, de l'argile ou du calcaire sur des surfaces considérables.

Les massifs se manifestent parfois à la surface par des protubérances grisâtres ou brunâtres; mais, le plus souvent, une couche plus ou moins épaisse de sable les recouvre et ce n'est que par des sondages multiples qu'on peut s'assurer de leur présence.



Le massif ne se compose pas exclusivement de phosphate en roche; il contient, au contraire, une proportion notable de phosphate tendre, sensiblement de même couleur que le *Rock phosphate* et désigné sous le nom de *Soft phosphate*. Il s'y trouve, en outre, du sable blanc et de l'argile blanche. A première vue, on n'aperçoit qu'un ensemble homogène; mais, en y regardant de près, il est aisé de distinguer l'une de l'autre les parties constitutives du massif.

Certains blocs ou *boulders* sont très massifs et durs; cependant leur extraction exige rarement l'emploi de la dynamite; mais ils offrent une assez grande résistance au broyage. Au contraire, le *Soft phosphate*, dont on trouve parfois des amas assez considérables au voisinage du phosphate dur, s'écrase facilement entre les doigts, à la façon du blanc de Meudon.

Les gisements du *Rock phosphate* sont concentrés dans une zone grossièrement parallèle à la côte ouest de la Floride, depuis Tallahassee jusque vers Tampa; cette zone, assez étroite et longue de près de 350 kilomètres, se trouve à une distance de la mer variant de 30 à 50 kilomètres en général, rarement de 60 à 70 kilomètres.

2° *Phosphate en nodules.* — Les gisements de phosphate en nodules sont situés plus au Sud, principalement dans la vallée de la *Peace river*, cours d'eau qui prend sa source au nord de Bartow et s'écoule vers le sud dans l'estuaire de Charlotte Harbor, près de Punta Gorda.

On distingue les nodules de rivière (*River pebble*) et les nodules de terre (*Land pebble*). Ces deux variétés de phosphates paraissent avoir une origine commune; mais les premiers ont été lavés par les eaux, qui les ont remaniés, tandis que les derniers se trouvent dans le sol, empâtés de sable et d'argile.

Les nodules du *Land pebble*, qui paraissent provenir eux-mêmes d'un premier remaniement du *Rock phosphate*

par les cours d'eau de l'âge pliocène ou peut-être pléistocène, sont blanchâtres ou brunâtres, peu arrondis et de dureté variable, suivant qu'ils proviennent de phosphate en roches plus ou moins dur ou tendre.

Ils forment avec la gangue sableuse une sorte de conglomérat meuble, de teneur peu uniforme, occupant le fond d'anciennes et très larges vallées et recouvert par des alluvions d'épaisseur variable. Il arrive quelquefois, pour les dépôts situés au-dessus du niveau des eaux, que des infiltrations ferrugineuses réunissent les nodules en un véritable conglomérat ; le minerai, même après concassage et criblage, reste alors trop chargé de fer et d'alumine pour être recherché.

Quant au *River pebble*, il est exploité dans le lit des rivières actuelles, la Peace river et quelques autres de la même région.

Dans le terrain sableux et presque plat, dont le fond est occupé par les nodules du *Land pebble*, les rivières tracent capricieusement leurs méandres et changent assez souvent de cours pendant la saison des pluies; les nodules remaniés s'arrondissent et prennent sous l'eau une couleur d'un bleu presque noir, qui paraît devoir être attribuée aux matières organiques et surtout au tannin ; on sait, en effet que, dans divers pays, dans le centre de la France notamment, ces matières donnent souvent une teinte sombre au fond des rivières dépourvues de calcaire.

Les graviers et nodules de rivières forment des accumulations plus ou moins considérables suivant les sinuosités ou la vitesse du cours d'eau ; dans certains endroits les dépôts se reforment à mesure qu'ils ont été exploités.

Les méthodes d'exploitation des phosphates en roche et en nodules, soit à terre, par excavateur ou par la méthode hydraulique, soit sous l'eau, dans les rivières ou dans les savanes marécageuses, par les dragues ordinaires ou les dragues à succion, ont été décrites dans les ouvrages que j'ai signalés au début de ce chapitre. Je m'abstiendrai d'en parler, ainsi que des opérations ultérieures, ayant pour but l'enrichissement des phosphates.



D'après M. Ladureau, les minerais de la Floride arrivent, à la suite de ces opérations, à une teneur assez régulière. Exprimée en phosphate tribasique de chaux, la teneur générale est comprise : pour les trois variétés de phosphate en roche (*Hard rock*, *Plate rock* et *Soft phosphate*) entre 70 et 80, parfois même 83 p. 100 ; pour le *Land pebble*, de 60 à 70 p. 100 ; pour le *River pebble* entre 55 et 62 p. 100.

M. Ladureau a eu l'obligeance de me remettre, avec leurs noms, une collection choisie d'échantillons des principaux types, que je désirais soumettre à l'analyse et qui sont maintenant déposés à la *Collection des gîtes* de l'École des Mines.

Je vais donner, après une très courte description de ces échantillons, les résultats des essais et des analyses.

CXVII. *Hard rock* ou phosphate en roche dure, concrétionnée, avec cavités irrégulières, cassure mate, de couleur chamois, poussière blanc jaunâtre.

CXVIII. *Plate rock* ou phosphate en roche plate, demi-dur, à cassure mate, de couleur blanc jaunâtre, ainsi que la poussière.

CXIX. Autre échantillon de *Plate rock*, en plaques à surfaces mamelonnées, de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, avec de minces intervalles vides. Couleur gris jaunâtre, poussière blanchâtre.

CXX. *Soft phosphate*, phosphate tendre, terreux, s'écrasant entre les doigts, de couleur blanc jaunâtre.

CXXI. *Pebble*, phosphate en masses concrétionnées et mamelonnées, à surface noire et à poussière d'un bleu noirâtre.

CXXII. *Drift* ou *Gravel*, phosphate bréchiforme, com-

posé de fragments concrétionnés à cassure grise, avec zones d'accroissement noir bleuâtre et cavités mamelonnées, rappelant l'aspect des phosphates du Quercy.

CXXIII. *River pebble*, phosphate de rivière, de la Peace river, en petits nodules ou cailloux arrondis, les uns noirs, d'autres gris, à surfaces mamelonnées, retenant des coquilles et des dents fossiles. Poussière d'un gris bleuâtre.

L'essai pour acide phosphorique et fluor a donné :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| CXVII | 37,76 | 3,74 | 3,37 | 1,11 |
| CXVIII | 36,22 | 3,50 | 3,23 | 1,08 |
| CXIX | 36,46 | 3,66 | 3,25 | 1,13 |
| CXX | 33,52 | 3,19 | 2,99 | 1,07 |
| CXXI | 35,24 | 3,36 | 3,14 | 1,07 |
| CXXII | 33,50 | 3,79 | 2,99 | 1,27 |
| CXXIII | 27,72 | 3,57 | 2,47 | 1,45 |

En outre, trois échantillons appartenant aux trois variétés du *Hard rock*, en roche massive, jaunâtre, du *River pebble*, en petits grains noirs arrondis, et du *Soft phosphate* en masse blanche friable, ont été analysés d'une manière complète : leur composition peut être ainsi représentée :

| | CXXIV Hard rock | CXXV River pebble |
|---|---|---|
| Phosphate de chaux | 83,44 | 61,78 |
| Fluorure de calcium | 6,59 | 7,24 |
| Chlorure | traces | traces |
| Sulfate de chaux | 0,51 | 1,45 |
| Carbonate de chaux | — | 7,54 |
| Carbonate de magnésie | 0,69 | 0,54 |
| Peroxyde de fer et alumine | 3,70 | 7,34 |
| Résidu insoluble | 1,05 | 9,65 |
| Eau et matière organique | 3,52 | 3,96 |
| | 99,50 | 99,50 |



| | CXXVI Soft phosphate |
|---|---|
| Phosphate de chaux | 71,06 |
| Phosphate d'alumine | 7,86 |
| Phosphate ferrique | 1,32 |
| Fluorure de calcium | 6,55 |
| Chlorure | traces |
| Carbonate de chaux | 7,18 |
| Carbonate de magnésie | traces |
| Résidu insoluble | 0,15 |
| Eau et matière organique | 5,90 |
| | 100,02 |

Les relations entre l'acide phosphorique et le fluor sont exprimés par les nombres suivants :

| | $P^2O^5$ | $fl$ | Fl | $\frac{fl}{Fl}$ |
|---|---|---|---|---|
| CXXIV | 38,21 | 3,21 | 3,34 | 0,96 |
| CXXV | 28,30 | 3,53 | 2,52 | 1,40 |
| CXXVI | 38,26 | 3,83 | 3,41 | 1,12 |

Les analyses montrentq ue le phosphate tendre ou *Soft phosphate* diffère du phosphate dur et du phosphate en nodules non seulement par sa friabilité, mais aussi par sa composition, dans laquelle entrent des proportions très notables de phosphate d'alumine et de phosphate ferrique. On se rappelle que ces deux caractères appartiennent aux phosphates terreux d'alumine, comme la *Minervite*, dont il est parlé plus haut; mais, contrairement à celle-ci, le *Soft phosphate* ne renferme pas de potasse.

Sans insister sur les différences qui existent entre le *Hard rock* et le *River pebble*, j'appellerai seulement l'attention sur la proportion de fluorure de calcium, qui est exceptionnellement élevée dans le phosphate de rivière, et qui, même dans la plupart des autres échantillons, atteint ou dépasse celle de l'apatite normale.

Ce fait peut sembler surprenant à un double titre : d'une part les phosphates de la Floride sont, en réalité,

des phosphates concrétionnés, comme ceux du Quercy, du Gard, de l'Oranais, etc., qui tous sont extrêmement peu fluorés ; d'autre part, ils sont d'âge relativement récent, puisque tous appartiennent aux terrains tertiaires, et il semble qu'il y ait contradiction entre le degré de fluoration que je viens de signaler et l'observation générale que j'avais faite antérieurement au sujet des ossements fossiles, à savoir : que leur teneur en fluor est d'autant moindre qu'ils sont d'âge plus récent (*).

En effet, dans les conditions ordinaires, d'après mes précédentes expériences, des os de vertébrés terrestres de la période éocène, qui n'auraient été exposés qu'à l'action ordinaire des eaux douces depuis l'époque de leur enfouissement dans la terre, ne devraient pas avoir une teneur en fluor supérieure à 2 p. 100.

Mais, en examinant les conditions spéciales dans lesquelles se sont probablement formés les gîtes phosphatés dont nous parlons, on trouvera, je crois, l'explication de cette contradiction apparente.

Il me paraît, en effet, tout à fait vraisemblable que les eaux de la mer ont joué un rôle important dans la formation des gîtes de la Floride, comme dans celle des phosphates éocènes d'Algérie et de Tunisie.

J'ai fait observer tout à l'heure que les gîtes les plus nombreux et les plus riches de la Floride étaient situés près des côtes de la péninsule, qui touchent au golfe du Mexique. Ce golfe aux eaux tièdes nourrit une multitude prodigieuse de poissons et d'oiseaux pêcheurs, tandis que, sur la côte de l'Atlantique, on voit beaucoup moins de ces animaux et l'on trouve aussi beaucoup moins de phosphates. Il y a, à mes yeux, une relation étroite entre ces deux faits : la présence des oiseaux et des

(*) Recherches sur la composition des os modernes et des os fossiles; *Annales des Mines*, 1893, 1er semestre.



poissons en quantités innombrables et l'existence des phosphates dans l'Ouest de la Floride.

Cette relation est bien mise en relief dans la page suivante empruntée au mémoire que M. Ladureau a rédigé au retour d'une mission de plusieurs mois sur les exploitations de la Floride (*) :

« On est, dit-il, généralement d'accord pour attribuer aux phosphates de Floride une origine animale ; on les considère comme le produit de l'accumulation, en certains points de la côte, des ossements et des déjections de légions innombrables de poissons, de mammifères et probablement aussi d'oiseaux, qui se sont succédé aux mêmes endroits durant des milliers d'années. J'incline à croire que certains dépôts de phosphate amorphe demi-tendre, qui ont, comme à Dunnellon, de grandes profondeurs, sont tout simplement d'anciens gisements de guano déposés par les oiseaux de mer, qui pullulaient autrefois sur les rives du golfe du Mexique, guano dont presque toute la matière animale a disparu, soit qu'elle ait été entraînée peu à peu par les pluies continues, qui règnent dans ce pays de mai à octobre, soit qu'elle ait été transformée en produits volatils par différentes fermentations, ainsi que cela a lieu de nos jours dans les îles Galapagos, sur la côte du Chili et en d'autres points, où le guano ne renferme plus guère que du phosphate.

Quant aux plaques cristallines et aux autres phosphates de roche dure, je pense qu'ils sont le résultat de la dissolution des amas d'os et d'excréments, dont j'ai parlé, par des eaux souterraines chargées de gaz acides, comme on en trouve encore aujourd'hui dans beaucoup de points en Floride. Ces eaux, saturées d'hydrogène sulfuré, qui, par son oxydation à l'air, donne de l'acide sulfurique, ont dû

(*) Les phosphates de la Floride et l'Agriculture française, *Société nationale d'Agriculture de France*, t. CXXXV des *Mémoires*.

dissoudre peu à peu ce phosphate, et, si elles rencontraient sur leur passage des terrains imperméables, elles l'y déposaient en s'évaporant, en cristallisation confuse, mais très purifié et débarrassé d'une grande partie du carbonate de chaux, auquel il était primitivement mélangé..... »

Il ne me semble même pas nécessaire de recourir à l'hypothèse d'eaux et de gaz acides provenant d'émanations sulfurées pour expliquer la dissolution du carbonate de chaux et celle du phosphate. J'ai déjà dit plus haut que cette dissolution était favorisée dans les eaux douces et surtout dans les eaux de la mer par la présence de l'acide carbonique et des sels ammoniacaux résultant de la décomposition à l'air des matières organiques azotées.

Or, pendant une longue suite de siècles, les terrains plats de la Floride, encore aujourd'hui peu élevés au-dessus de la mer, ont dû être, chaque jour, alternativement couverts par les eaux et exposés aux ardeurs du soleil. Même lorsque les marées ordinaires n'eurent plus accès régulier sur ces terrains, lentement soulevés par le mouvement d'ondulation de l'écorce terrestre, les tempêtes continuèrent à couvrir les côtes, jusqu'à une grande distance, et à pousser vers les dépressions du sol les dépouilles de myriades d'animaux marins, les déjections et les débris de toutes sortes laissés par d'innombrables oiseaux pêcheurs, qui furent la matière première des phosphates.

Cette action des eaux de la mer, tantôt envahissant les côtes et baignant les débris animaux, riches en phosphore, tantôt s'évaporant autour d'eux avec rapidité, action sans cesse renouvelée pendant un grand nombre de siècles, me paraît fournir l'explication cherchée de la dissolution et du dépôt, sous forme de concrétions, d'une quantité si considérable de phosphates.

Les amas irréguliers du *Hard rock* ont dû être constitués directement par l'évaporation des eaux provenant



du lessivage journalier de ces masses de débris et de déjections, riches en azote et en phosphore, et par le dépôt de concrétions phosphatées dans les crevasses du sol. Les autres sortes de phosphates, d'origine plus récente, telles que les nodules de terre et de rivière, paraissent n'être que des produits de remaniement du *Hard rock*.

Or, les mêmes phénomènes ont été très favorables à la fluoration des phosphates qui se déposaient ; bien que les eaux de la mer ne renferment que de faibles quantités de fluorures (*), leur renouvellement incessant et leur évaporation au milieu des phosphates, qu'elles imprégnaient, ont dû avoir pour objet de pousser très loin la fluoration. C'est précisément ce que nous apprend l'analyse, puisque les phosphates de la Floride atteignent ou dépassent la teneur en fluor des apatites exclusivement fluorées.

C'est donc, sans doute, à l'intervention très prolongée des eaux de la mer que les phosphates de la Floride doivent d'être tout à la fois concrétionnés et très riches en fluor, qualités qui semblaient exclusives l'une de l'autre d'après les exemples précédemment examinés. On peut croire, au contraire, que les phosphorites exploitées dans les poches de l'Oranais et du Midi de la France sont généralement pauvres en fluor parce qu'elles proviennent de phosphates terrestres peu fluorés, dissous et déposés par des eaux douces, qui ne renfermaient que des traces de fluorures.

---

(*) Voir la note de la page 175.

# THÉORIE

DE LA

# STABILITÉ DES LOCOMOTIVES

(SECONDE PARTIE) (*)

## MOUVEMENT DE LACET

Par M. J. NADAL, Ingénieur des Mines.

## CHAPITRE PREMIER.

### MOUVEMENT DE LACET D'UNE LOCOMOTIVE. FORCES APPLIQUÉES.

### I. — Considérations sur les mouvements parasites. Leur définition.

D'après un principe de cinématique, quand un solide est animé d'un mouvement quelconque, on peut décomposer ce dernier en une translation du centre de gravité et en une rotation autour de ce point. Ce mouvement relatif de rotation peut s'étudier comme si le centre de gravité était fixe et peut être regardé comme la résultante de trois mouvements de rotation élémentaires, qui, pour une locomotive, sont les suivants :

1° Une rotation autour d'un axe vertical (lacet) ;

2° Une rotation autour d'un axe horizontal parallèle à la voie (roulis) ;

(*) Voir tome IX, 4e livraison 1896, p. 413-467.



3° Une rotation autour d'un axe horizontal normal à la voie (tangage) ;

et dont les équations s'obtiennent en égalant à zéro la somme des moments des forces extérieures et des forces d'inertie pris par rapport à chacun des trois axes passant par le centre de gravité.

Enfin, les mouvements parasites ne donnant lieu qu'à des déplacements très petits, on peut considérer chacun d'eux comme indépendant.

Les forces extérieures agissant sur une locomotive sont :

1° Les réactions horizontales et verticales exercées par la voie ; elles dépendent de la pression des roues sur leurs points d'appui, sur les rails, et, par suite, des oscillations du poids suspendu sur les ressorts ;

2° L'action du train, qui est tantôt une résistance agissant sur le crochet de la traction, à peu près dans le plan médian, tantôt une poussée agissant sur les tampons et, par suite, à une certaine distance du plan médian ;

3° La pesanteur ;

4° Les réactions latérales que le tender exerce sur la locomotive et qui dépendent de la disposition de l'attelage et des tampons ;

5° Les forces d'inertie provenant des pièces en mouvement relatif.

Les mouvements de rotation autour des deux axes horizontaux se traduisent par une oscillation du poids suspendu sur les ressorts et ne se font pas sentir sur le train d'essieux, sinon les roues se trouveraient soulevées au-dessus des rails, ce qui n'arrive pas ordinairement. La tension des ressorts ne peut devenir négative que dans des cas exceptionnels. Les pièces en mouvement relatif n'exercent aucune influence sur les oscillations du bâti, c'est-à-dire sur le roulis et le tangage, tant qu'elles ne sont pas capables de soulever les roues.

En sorte que le mouvement d'une locomotive autour de son centre de gravité ne se compose réellement que d'une oscillation du bâti sur les ressorts et d'une rotation de l'ensemble de la machine autour d'un axe vertical. Cette rotation est simple, s'il n'y a pas de jeux entre les essieux et le bâti. Dans le cas contraire, c'est-à-dire en pratique, la rotation du bâti peut être différente de celle du train d'essieux.

Nous avons étudié dans la première partie de ce mémoire les oscillations du poids suspendu. Nous nous occuperons maintenant du mouvement de lacet.

Considérons d'abord la rotation du bâti seul autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité. Il suffit, à cet effet, d'introduire parmi les forces agissant sur le bâti les réactions que les essieux exercent sur lui par l'intermédiaire des boîtes à graisse et des plaques de garde ou glissières. En dehors de ces réactions, les forces extérieures donnant lieu à un mouvement de rotation autour d'un axe vertical se réduisent aux efforts exercés par la vapeur sur les plateaux des cylindres. Quant à la résistance du train et aux autres réactions du tender et du train sur la machine, nous n'en tiendrons compte que plus tard.

Soient $I_1$ le moment d'inertie du bâti de la locomotive; $\theta$, l'angle que fait le plan médian avec le plan vertical passant par l'axe de la voie; et N, le moment des forces extérieures.

L'équation du mouvement de rotation est :

$$I_1 \frac{d^2\theta}{dt^2} = N.$$

Comme nous l'avons dit, les forces qui entrent dans le calcul de N, et dont l'étude préalable est nécessaire, se composent des efforts exercés par la vapeur sur les plateaux des cylindres, et des réactions entre les plaques



de garde et les boîtes à graisse. Ces réactions sont de nature complexe et peuvent se diviser en trois composantes distinctes, qui proviennent :

1° De l'action de la vapeur sur le piston, et de là sur le bouton de manivelle ;

2° De l'effet des masses en mouvement relatif;

3° De la résistance qu'oppose la voie aux mouvements latéraux.

### II. — Étude des forces provenant de l'action de la vapeur et de celles des pièces en mouvement relatif. Locomotives à cylindres extérieurs.

La pression effective, $P_0$, de la vapeur agissant sur le piston est employée à faire tourner les roues motrices, à communiquer l'accélération aux masses en mouvement relatif et à vaincre les résistances passives du mécanisme (frottements du piston et de sa crosse, du tiroir et des articulations). Si ces deux dernières causes de dépense de force n'existaient pas, la pression $P_0$ serait transmise intégralement à la crosse du piston, où elle se décomposerait en une force verticale appliquée à la glissière, $P_0 \operatorname{tg} \beta$, et en une force dirigée suivant la bielle motrice, $\frac{P_0}{\cos \beta}$. Cette dernière, appliquée au bouton de manivelle, se répartirait à son tour entre la boîte à graisse, le point de contact de la roue avec le rail et la bielle d'accouplement, s'il en existe.

Pour tenir compte des résistances passives, il faudrait multiplier la valeur de la pression par un coefficient inférieur à l'unité, car elles déterminent une perte sèche de travail. On peut donc faire abstraction de ces résistances en supposant implicitement qu'on a introduit ce coefficient de réduction dans le calcul une fois pour toutes.

La force d'inertie des pièces mobiles modifie la répar-

tition de la pression, tant à la crosse du piston qu'au bouton de manivelle ; mais il n'y a aucune perte de travail. En effet, le piston et les autres pièces subissent une accélération horizontale pendant la première moitié de la course, puis le mouvement est retardé. Ordinairement les forces d'inertie agissent d'abord à l'encontre de la pression de la vapeur, puis dans le même sens, avec la même intensité dans les deux cas. Il n'y a donc aucune perte de travail : on rend dans la seconde partie de la course ce qui a été absorbé dans la première.

Les pièces mobiles peuvent se décomposer en deux catégories :

1° Les pièces en mouvement alternatif constituées par une partie de la bielle motrice, par le piston, sa tige et sa crosse. Le centre de gravité de ces pièces se trouve, à peu de chose près, sur l'axe du cylindre ; leur force d'inertie est toujours dirigée suivant cet axe et a une intensité variable qui vient diminuer la force résultant de la pression de la vapeur pendant la première moitié de la course et l'augmenter pendant l'autre moitié :

2° Les pièces tournantes, qui font que le centre de gravité de la roue est excentrique. La force d'inertie (ou force centrifuge) de ces pièces a une direction variable ; elle produit donc un double effet : modification des réactions horizontales de la boite à graisse sur la plaque de garde, modification de la réaction verticale de la roue sur le rail.

Considérons une machine ayant un seul essieu moteur et supposons que la vitesse de rotation soit uniforme. Soit $F_a$ la force d'inertie des pièces à mouvement alternatif. La force transmise par la vapeur, dont la pression dans le cylindre est $P_0$, à la tête de manivelle est $\frac{P}{\cos\beta}$, P étant égal à $P_0 - F_a$. Le point d'application de cette force peut être reporté en D (*fig.* 1), sur le rayon vertical



OA, et se décompose en une force horizontale faisant tourner la roue et une force verticale augmentant la pression de la roue sur le rail. La composante horizontale, qui n'est autre que P, se répartit aux points O et A, sui-

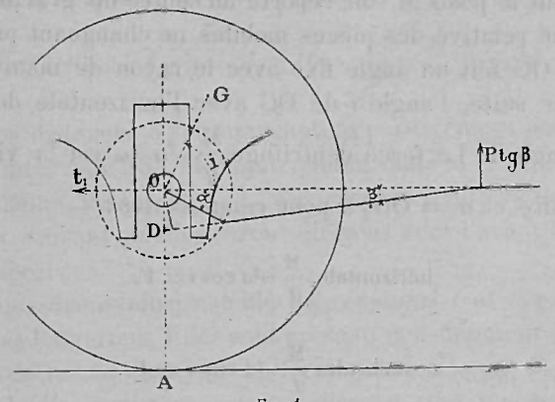



Fig. 1.

vant les bras de levier AD et OD. Par conséquent, elle donne lieu à une réaction $t_1$, agissant au point O de l'essieu, dont la valeur est :

$$t_1 = P\,\frac{AD}{OA} = P\left(1 - \frac{r}{R}\,\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta}\right).$$

De même, la réaction de la roue sur le rail serait (en supposant la roue dans le plan de l'axe du cylindre) :

$$T_1 = P\,\frac{OD}{OA} = P\,\frac{r}{R}\,\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta}.$$

S'il s'agit d'une machine à plusieurs essieux moteurs, les équations ci-dessus sont applicables ; seulement $t_1$ et $T_1$ représentent alors la somme des efforts exercés sur chaque essieu et à la jante de chaque roue.

A la valeur de $t_1$, il faut ajouter les réactions provoquées par les pièces tournantes. Ces diverses pièces, n'étant pas

dans un même plan, agissent en divers points de l'essieu considéré comme un levier droit. Prenons celles d'entre elles qui sont dans un même plan, et soit G la position de leur centre de gravité pour un angle de manivelle $\alpha$. Supposons que tout le poids M soit reporté au centre de gravité. La position relative des pièces mobiles ne changeant pas, le rayon OG fait un angle fixe avec le rayon de manivelle, et, par suite, l'angle $i$ de OG avec l'horizontale dépend de l'angle $\alpha$. La force centrifuge $\frac{M}{g}\omega^2 a$ ($\omega$ est la vitesse angulaire et $a = OG$) a pour composantes :

$$\text{horizontale, } \frac{M}{g}\omega^2 a \cos i = F,$$

et

$$\text{verticale, } \frac{M}{g}\omega^2 a \sin i = F_v.$$

Elle est dirigée suivant le rayon OG, et son point d'application peut être reporté en O. Par conséquent, la force $t_2$, agissant sur l'essieu du fait de la force centrifuge, est égale à la composante horizontale de cette dernière, et il n'y a pas de réaction horizontale $T_2$ sur la voie.

Au total, une série d'efforts situés dans des plans différents, $t_1$, $t_2$, $t_3$, etc., d'un côté de la machine, $t'_1$, $t'_2$, $t'_3$, etc., de l'autre côté, sont exercés sur l'essieu en des points différents et tendent à presser les boîtes à graisse contre les plaques de garde aux points S et S' (*fig.* 2). On détermine facilement les réactions exercées $t$ et $t'$. Soient: $l$, la distance SS'; et $b_1$, $b_2$, $b_3$, etc., les distances, égales des deux côtés,

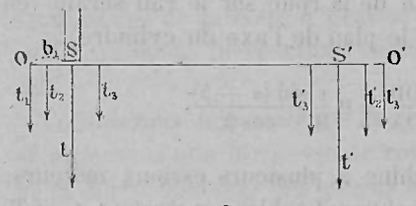


Fig. 2.



des points d'application des forces $t_1$, $t'_1$, $t_2$, $t'_2$, etc., aux points S, S'. Les valeurs $t$ et $t'$ sont données par les relations suivantes :

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + \frac{b_1}{l}(t_1 - t'_1) + \frac{b_2}{l}(t_2 - t'_2) + \ldots$$

$$t' = t'_1 + t'_2 + t'_3 + \ldots + \frac{b_1}{l}(t'_1 - t_1) + \frac{b_2}{l}(t'_2 - t_2) + \ldots$$

Les distances $b$ seront comptées positivement en dehors de l'intervalle SS', et négativement dans le cas contraire. De même, les forces $t_1$, $t_2$, etc., seront positives ou négatives, suivant qu'elles seront dirigées vers l'avant ou vers l'arrière.

Nous avons ainsi calculé les réactions $t$ et $t'$ exercées sur les longerons. Elles sont presque constamment dirigées dans le même sens que la force transmise par la vapeur aux bielles motrices, c'est-à-dire en sens inverse de la pression exercée sur les plateaux des cylindres. La différence $P_0 - t$ représente donc la force réelle appliquée au longeron ; c'est elle qui fait équilibre à la résistance du train et *qui, par suite, fait avancer la locomotive*.

Elle est variable à chaque instant d'un côté et de l'autre de la machine ; par suite, elle tend à imprimer au bâti un mouvement de rotation autour d'un axe vertical. Ce mouvement de rotation dépend du moment des forces $P_0$ et $t$. Or, $t$ étant une résultante de forces parallèles, son moment est égal à la somme des moments de ses composantes. Cela nous dispensera de calculer la valeur même de $t$.

D'après ce qui précède, les éléments à déterminer pour résoudre le problème sont :

1° La pression $P_0$ ; elle est donnée par les diagrammes des pressions de la vapeur dans les cylindres ;

2° La force P, égale à $P_0$ moins la force d'inertie des pièces animées d'un mouvement alternatif ;

3° La force centrifuge des pièces tournantes.

En appelant $m_1$, $m_2$, etc., la masse de chacune des pièces tournantes, et $x$, $y$, les coordonnées de leur centre de gravité par rapport à l'axe horizontal et à l'axe vertical passant par le centre de la roue, la composante horizontale de la force centrifuge est :

$$\Sigma m x \omega^2,$$

et la composante verticale :

$$\Sigma m y \omega^2.$$

Il est facile de calculer $\Sigma mx$ et $\Sigma my$, en supposant que le poids de la bielle motrice se répartisse à la crosse du piston et au bouton de manivelle en raison inverse de la distance du centre de gravité de la bielle à chacun de ces deux points, et que le poids de la bielle d'accouplement se répartisse de la même façon entre les boutons des manivelles motrice et accouplée. Cette répartition donne une approximation suffisante en pratique.

Soient : $a$ et $a'$, les distances du centre de gravité de la manivelle motrice, de poids M et de rayon $r$, au centre O de l'essieu moteur et de celui de la manivelle accouplée M′ au centre O′ de l'essieu accouplé ;

$c$ et $c'$, les distances à O et O′ des centres de gravité des contrepoids C et C′ qui sont placés sur des rayons faisant les angles $\varphi$ et $\varphi'$ avec les manivelles M et M′ ;

$d$, la distance du centre de gravité de la bielle motrice, de poids B et de longueur $b$, à la tête de manivelle.

Les valeurs de $gmx$ et de $gmy$, pour les parties tournantes d'un même côté de la machine, sont données par le tableau suivant :



1° *Essieu* O.

| | $gmx$ | $gmy$ |
|---|---|---|
| Manivelle M | $Ma\cos\alpha$ | $Ma\sin\alpha$ |
| Contrepoids C de l'essieu moteur | $Cc\cos(\alpha+\varphi)$ | $Cc\sin(\alpha+\varphi)$ |
| Bielle motrice B | $B\left(1-\frac{d}{b}\right)r\cos\alpha$ | $B\left(1-\frac{d}{b}\right)r\sin\alpha$ |
| Bielle d'accouplement B′ | $\frac{B'}{2}r\cos\alpha$ | $\frac{B'}{2}r\sin\alpha$ |

2° *Essieu* O′.

| | | |
|---|---|---|
| Manivelle M′ | $M'a'\cos\alpha$ | $M'a'\cos\alpha$ |
| Contrepoids C′ de l'essieu accouplé | $C'c'\cos(\alpha+\varphi')$ | $C'c'\sin(\alpha+\varphi')$ |
| Bielle d'accouplement | $\frac{B'}{2}r\cos\alpha$ | $\frac{B'}{2}r\sin\alpha$ |

D'ailleurs, ce qu'il nous importe de calculer, c'est le moment de rotation auquel donne lieu la force centrifuge des pièces tournantes ; il faudra donc faire la somme du produit de chaque composante, $mx$, par sa distance au plan médian.

La force d'inertie, $F_a$, des pièces animées d'un mouvement alternatif (piston, tige et crosse, dont le poids total est Q, et fraction $B\frac{d}{b}$ du poids de la bielle motrice) a pour expression :

$$F_a = -\frac{1}{g}\left(Q+B\right)\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{g}\left(Q+B\frac{d}{b}\right)r\omega^2\cos\alpha.$$

*Application numérique.* — Nous allons calculer les expressions ci-dessous avec les données suivantes, qui

ont été prises sur une machine à voyageurs de la Compagnie d'Orléans, série 265 à 400.

| | POIDS DES PIÈCES | DISTANCE du centre de gravité au centre de l'essieu | DISTANCE du centre de gravité à la tête de manivelle | LONGUEURS $r$ et $b$ | DISTANCE au plan médian |
|---|---|---|---|---|---|
| | kilogs | | | | |
| Manivelle motrice, y compris la fausse manivelle..... | 113 | 0m,21 | » | 0m,325 | 0m,95 |
| Manivelle d'accouplement M'.. | 34 | 0 ,21 | » | id. | 0 ,93 |
| Bielle motrice B..... | 122 | » | 0m,80 | 1m,80 | 0 ,95 |
| Bielle d'accouplement B'.... | 119 | » | » | 2 ,1 | 1 ,06 |
| Piston, tige et crosse Q..... | 152 | » | » | » | 0 ,95 |
| Contrepoids C de la roue motrice, calé à 180° de la manivelle..... | 143 | 0 ,80 | » | » | 0, 76 |
| Contrepoids C' de la roue accouplée, calé à 180° de la manivelle..... | 65 | 0 ,86 | » | » | 0, 76 |

Nous avons pour les pièces tournantes :

$$g\Sigma mx = \left[Ma + B\left(1 - \frac{d}{b}\right)r + B'r + M'a' - Cc - C'c'\right]\cos\alpha = -78{,}79\cos\alpha.$$

Le signe — signifie que la direction de la force centrifuge, $\omega^2\Sigma mx$, est en sens inverse de celle de la manivelle :

$$\text{Moment de } g\Sigma mx = -38{,}39\cos\alpha.$$

Pour l'autre côté de la machine (le côté gauche), où la manivelle est en retard de 90°, il suffit de remplacer $\cos\alpha$ par $\sin\alpha$. Le moment de rotation, $N_r$, autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité est donc :

$$N_r = -38{,}39\,\frac{\omega^2}{g}\,(\cos\alpha + \sin\alpha).$$



La valeur de $F_a$ pour le côté droit de la machine est :

$$F_a = 67{,}047\,\frac{\omega^2}{g}\cos\alpha.$$

Les quantités $N_r$ et $F_a$ peuvent être représentées graphiquement par une simple ligne droite, si on prend pour abscisse, non plus l'angle $\alpha$, mais la longueur parcourue par le piston. L'ordonnée de cette droite est nulle au milieu de la course (en négligeant l'obliquité de la bielle) et égale au coefficient de cos $\alpha$, affecté tantôt du signe + et tantôt du signe —, aux extrémités de la course.

*Construction du moment total de rotation.* — D'après ce que nous avons dit plus haut sur les moyens de calculer les efforts exercés sur le longeron, la construction graphique du moment total de rotation peut s'effectuer comme il suit : je construis d'abord, en prenant pour abscisses les longueurs parcourues par le piston, le diagramme $P_0$ des pressions effectives de la vapeur sur le piston, puis la droite représentant la force d'inertie, $F_a$, qui est toujours de même signe que $P_0$ au début de la course. Ensuite je construis par points la courbe :

$$t_1 = (P_0 - F_a)\left(1 - \frac{r}{R}\,\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta}\right).$$

Le produit de $P_0 - t_1$ par la distance de l'axe du cylindre au plan médian me donne un moment $N_a$ qui, ajouté à $N_r$, fournit le moment total N.

*Exemple.* — Dans l'application numérique ci-dessus, le diamètre des roues étant de 2 mètres et les diagrammes des pressions dans le cylindre (course du piston : 0m,65; diamètre : 0,44) étant ceux des *fig.* 1, 2 et 3 (Pl. IV) pour des vitesses de 3, 4 et 5 tours par seconde, les

valeurs du moment N (*) sont données, dans les *fig.* 4, 5 et 6 (Pl. IV), par les courbes pointillées pour le côté droit de la machine, par les courbes ponctuées pour le côté gauche et par les courbes en traits pleins pour l'ensemble. Les ordonnées positives de N fournissent les moments tendant à faire tourner de droite à gauche.

On voit que la plus grande valeur du moment N est toujours négative, c'est-à-dire tend à faire tourner la machine de gauche à droite.

Les valeurs maxima de N sont:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Pour la vitesse de | 3 | tours par seconde..... | | 4,256 |
| » | 4 | » | ..... | 4,864 |
| » | 5 | » | ..... | 5,320 |

Si la machine était suspendue et maintenue latéralement par des ressorts placés au droit des roues d'avant, qui se trouvent à $2^{m},50$ environ du centre de gravité, les ressorts, pour ne pas fléchir sous l'effort du moment N, devraient avoir une bande initiale au moins égale à:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.702 | kilogr. pour la vitesse de | 3 | tours ou | $67^{km},86$ | à | l'heure |
| 1.945 | » | 4 | » | 90 ,46 | » | |
| 2.128 | » | 5 | » | 113 ,00 | » | |

Les valeurs de N dépendent de la distance des cylindres au plan médian, de la pression maxima de la vapeur et de la disposition, ainsi que du poids, des pièces en mouvement relatif.

Ainsi, quand on augmente le timbre de la chaudière dans une locomotive à simple expansion, le moment N croît, et la stabilité de la machine diminue.

Si on dispose les pièces en mouvement relatif de façon à se rapprocher le plus possible de l'équilibre horizontal,

(*) Le moment N est rapporté au centimètre carré de surface du piston ; cette surface étant de $0^{m2},1520$, une ordonnée de 1 centimètre représente un moment égal à 1520.



le moment N est minimum. C'est ce qui a lieu dans le type de locomotive pris plus haut comme exemple, où l'équilibre horizontal est bien près d'être réalisé.

En revanche, on est loin de l'équilibre vertical. La perturbation verticale, $F_v$, qui agit sur les roues motrices a pour valeur, de chaque côté de la machine :

$$F_v = -49,53 \frac{\omega^2}{g} \cos \alpha.$$

Son maximum est de :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1.795 | kilogrammes pour la vitesse de | 3 | tours |
| 3.192,5 | » | 4 | » |
| 4.988,2 | » | 5 | » |

La pression de chaque roue sur le rail, au repos, est de 6.500 kilogrammes. En marche, cette pression diminue par suite des oscillations des ressorts, et, aux vitesses considérées, sur une voie en bon état formée de rails de $5^{m},50$, où on admet des dénivellations aux joints de 4 millimètres, la diminution de la tension des ressorts peut atteindre de 1.200 à 1.500 kilogrammes pour les essieux moteurs. Par conséquent, lorsque la perturbation verticale dépasse 6.500 — 1.500 = 5.000 kilogrammes, la roue peut ne plus exercer aucune pression sur le rail et même être soulevée. *Cette circonstance*, qui se produit à la vitesse de 113 kilomètres à l'heure, *fixe une limite à la vitesse de marche.*

### III. — Locomotives à cylindres intérieurs.

Quand les cylindres sont intérieurs, le bras de levier, des efforts exercés par la vapeur et, par suite, le moment N sont très réduits.

Supposons que, dans l'exemple numérique ci-dessus, les cylindres soient intérieurs. La distance de l'axe du

cylindre au plan médian peut se trouver comprise entre $0^m,30$ et $0^m,32$, c'est-à-dire être à peu près le tiers de la valeur qu'elle possède quand les cylindres sont extérieurs.

Admettons que le poids de la manivelle motrice soit triplé, et que la manivelle d'accouplement soit placée à 180° de la précédente. Il suffira de mettre un contrepoids de 28 kilogrammes sur chaque roue accouplée et de 41 kilogrammes (au lieu de 143) sur chaque roue motrice pour que les pièces en mouvement relatif donnent un moment nul par rapport à l'axe vertical du centre de gravité.

La perturbation verticale, $F_v$, sur chaque roue motrice aura pour valeur :

$$F_v = 37{,}25 \frac{\omega^2}{g} \cos\alpha,$$

et sera, par suite, bien moindre que dans le cas des cylindres extérieurs.

Enfin, le moment N se trouvant réduit de plus de moitié, la disposition des cylindres à l'intérieur des longerons paraît très avantageuse au point de vue de la stabilité. On verra plus loin, dans l'étude du mouvement de lacet, à quoi se réduit réellement cet avantage.

### IV. — Locomotives compound à quatre cylindres.

Supposons que, dans une locomotive compound à quatre cylindres, les cylindres de grand diamètre soient à l'intérieur des longerons, et ceux de petit diamètre à l'extérieur. En calant à près de 180° les manivelles de chaque groupe de cylindres à haute et à basse pression), il est possible de réaliser en même temps l'équilibre vertical et l'équilibre horizontal des forces perturbatrices. Mais ce n'est pas là ce qui importe le plus. Il n'y a notamment qu'un mince avantage à réaliser l'équilibre horizontal; au contraire, il



y en a un très grand à annuler le moment des forces perturbatrices horizontales. Or, ce moment s'obtient en multipliant chaque force par sa distance au plan médian, distance qui est à peu près trois fois plus grande pour les pièces des cylindres à haute pression que pour les autres. On serait donc conduit à donner à ces dernières un poids exagéré.

Pour voir dans quelle mesure la question peut être pratiquement résolue, nous allons prendre un exemple avec les données suivantes :

Cylindre à basse pression (diamètre : 0,53 ; course : 0,64)

| | Poids | |
|---|---|---|
| Piston, tige et crosse.. | 180 kil. | ; distance au plan médian: 0,30 |
| Bielle motrice..... | 200 kil. | ; longueur: $2^m,40$ |
| Manivelle motrice du premier essieu moteur (coudé). Poids : 250 k. | | |

Cylindre à haute pression (diamètre: 0,34; course: 0,64):

| | Poids | |
|---|---|---|
| Piston, tige et crosse... | 120 kil. | ; distance au plan médian: 0,95 |
| Bielle motrice..... | 150 kil. | ; longueur: 3 mètres |
| Manivelle motrice du deuxième essieu moteur. Poids : 50 kilogr. | | |
| Manivelle d'accouplement du premier essieu moteur : | 35 | — |
| Bielle d'accouplement : 160 kilogr. ; longueur : 3 mètres. | | |

La force d'inertie $F_a$ produite par les pièces en mouvement alternatif est :

$$F_a\,(HP) = \left(Q + \frac{B}{2}\right) r \frac{\omega^2}{g} \cos\alpha = 66{,}30 \frac{\omega^2}{g} \cos\alpha,$$

$$F_a\,(BP) = 89{,}60 \frac{\omega^2}{g} \cos(\varphi + \alpha).$$

Supposons que l'angle $\varphi$, que fait la manivelle du cylindre BP avec la manivelle du cylindre HP, soit égal à $\pi - 23°$. Construisons la courbe des moments de la force que nous avons appelée plus haut $P_0 - t_1$, d'après le diagramme des pressions de la *fig.* 7 (Pl. IV), la vitesse

étant de 4 tours par seconde. On obtient ainsi la courbe $M_d$ pour le côté droit de la machine et la courbe $M_g$ pour le côté gauche (*) (*fig.* 8, Pl. IV). Pour avoir le moment total, N, on sait qu'il faut ajouter à $M_d$ et à $M_g$, ou en retrancher, suivant le cas, le moment $N_r$ de la force centrifuge des pièces tournantes, et ce qu'on cherche, pour atténuer autant qu'il se peut le mouvement de lacet, c'est que N soit le plus petit possible.

Le problème ainsi nettement posé se résout par des tâtonnements faciles. Il faut faire en sorte que $N_r$ soit de signe contraire à $M_d$ et s'en rapproche en valeur absolue.

Or, le moment de la force centrifuge des pièces tournantes, pour le côté droit de la machine, et en supposant les roues sans contrepoids, a la valeur suivante :

$$N_r = 93{,}76 \cos\alpha + 25{,}2 \cos(\varphi + \alpha).$$

Le premier terme du second membre est presque constamment de même signe que $M_d$ ; le second terme, $\varphi$ étant voisin de 180°, est ordinairement de signe contraire ; mais, comme il est plus petit que le premier, $N_r$ est au total de même signe que $M_d$. C'est le contraire qui devrait être. D'où résulte la nécessité de disposer des contrepoids sur les roues motrices.

Nous placerons un contrepoids de 140 kilogrammes sur chaque roue du second essieu moteur, à 180° de la manivelle motrice HP, et un contrepoids de 30 kilogrammes sur chaque roue du premier essieu, faisant un angle $\pi + 23°$ avec la direction de la manivelle motrice HP, ou un angle de 46° avec la manivelle BP. Le moment $N_r$ sera alors :

$$N_r = 8{,}76 \cos\alpha + 25{,}2 \cos(\alpha + \varphi) + 18 \cos(\alpha + \varphi + 46°);$$

(*) Les moments sont rapportés au centimètre carré de section du cylindre à haute pression Cette section étant de $0^{m2},0908$, il faut multiplier les ordonnées, comptées en centimètres, par 908 pour avoir les vraies valeurs des moments.



d'où se déduit la courbe $N_r$ de la *fig.* 8 (Pl. IV). La différence des ordonnées des courbes $M_d$ et $N_r$ donne le moment total $N_d$ pour le côté droit de la machine. En déplaçant toutes les courbes de $\frac{\pi}{2}$, j'obtiens le moment pour le côté gauche et, finalement, la résultante N pour l'ensemble.

Le moment maximum tend à faire tourner la machine de droite à gauche et est égal à 2.724. Il est près de la moitié de celui que nous avons constaté plus haut pour les machines à cylindres extérieurs, bien que la pression de marche soit de 14 kilogrammes au lieu de 10, et la puissance d'environ un tiers plus élevée.

Reste à voir si nous n'avons pas sacrifié l'équilibre vertical par l'application de nos contrepoids.

La composante de la perturbation verticale dans le plan de la roue est pour le premier essieu (essieu coudé) :

$$F_v = 39{,}9 \cos\alpha + 52 \cos(\alpha + \varphi) + 24 \cos(\alpha + \varphi + 46°);$$

ce qui se réduirait à :

$$F_v = -36{,}1 \cos\alpha,$$

si la manivelle BP et les contrepoids du premier essieu étaient à 180° de la manivelle HP.

La perturbation est plus élevée pour le second essieu et égale à :

$$F_v = -39 \cos\alpha.$$

Pour la vitesse de 6 tours par seconde, ou de $135^{km},7$ à l'heure avec des roues de 2 mètres, $F_v = 5.656$ kilogrammes.

Si donc la charge de l'essieu est de 14 tonnes, la vitesse limite pour laquelle l'adhérence des roues motrices peut disparaître complètement est d'environ 135 kilomètres à l'heure. L'équilibre vertical est, on le voit, satisfaisant.

## V. — Frottements des roues sur les rails dans les mouvements latéraux d'une locomotive.

Quand une machine repose sur la voie, son mouvement d'oscillation est tout autre que lorsqu'elle est librement suspendue, à cause des résistances qu'oppose la voie aux déplacements latéraux. Nous allons étudier ces résistances.

Nous admettrons qu'à l'état statique le centre de gravité de la locomotive se trouve dans le plan médian. Cette hypothèse n'est, d'ailleurs, pas absolument exacte pratiquement, quelque soin qu'on apporte au réglage d'une machine, car la répartition du poids sur les deux roues d'un essieu n'est pas égale, mais sujette à varier : 1° par suite de la différence d'usure des coussinets et des bandages ; 2° par suite de la modification au bout d'un temps plus ou moins long de la flexibilité des ressorts.

Le mouvement général de la locomotive se compose, comme nous l'avons vu plus haut, d'une translation du centre de gravité et d'une rotation autour d'un axe vertical passant par ce centre. Il s'agit d'abord de savoir en quoi consiste exactement le mouvement de translation.

Une locomotive progresse sur les rails par l'effet de la rotation des roues. Considérons le mouvement d'un essieu seul, qui est animé d'une vitesse de rotation constante $\omega$, dont les roues n'ont pas de conicité et qui est placé sur la voie (*fig.* 3) de façon à faire un angle $\theta$ avec la normale à la voie, et de façon que le centre O se trouve à une distance $\zeta$ de l'axe de la voie, $O_1y$. Cet essieu progresse sur les rails comme un rouleau cylindrique reposant sur un plan, c'est-à-dire dans une direction OA normale à l'essieu et avec une vitesse $\omega r$, $r$ étant le rayon du cylindre. Cette vitesse a pour composantes : 1° sur l'axe $O_1y$, parallèle à la voie, $\omega r \cos\theta$ ; 2° sur l'axe $O_1x$, $\omega r \sin\theta$. Supposons maintenant qu'on applique à cet essieu des forces capables de



produire un mouvement de rotation autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité O, mais telles que la vitesse angulaire $\omega$ reste constante. Le déplacement de l'essieu, pendant un temps infiniment petit $dt$, se composera alors d'une translation, égale à $\omega r dt$, suivant la normale OA, et d'une rotation $d\theta$ autour de O. L'angle $\theta$ pourra varier, mais la translation élémentaire se fera toujours suivant la normale à l'essieu et aura à chaque instant pour composantes : $\omega r \cos\theta dt$ suivant $Oy$, et $\omega r \sin\theta dt$ suivant $Ox$.

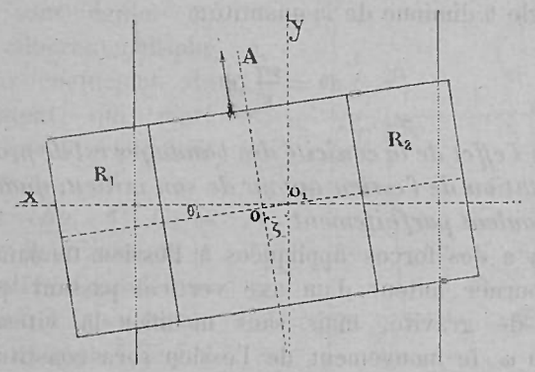



Fig. 3.

*La translation dépend donc de* $\theta$, *c'est-à-dire de la rotation.*

Supposons maintenant les deux roues de l'essieu coniques, elles sont placées sur la voie dans la même position que dans la *fig.* 3, et on suppose d'abord qu'il n'y ait aucune force appliquée à l'essieu, celui-ci étant simplement animé d'une vitesse de rotation uniforme. Il y aura, comme plus haut, roulement parfait et translation élémentaire dirigée suivant la normale à l'essieu. Seulement l'angle $\theta$ variera à chaque instant, par le fait du roulement, parce que la roue $R_1$ roule sur un rayon plus grand, et la roue $R_2$ sur un rayon plus petit que le rayon moyen $r$.

Soient $\zeta$ la distance $OO_1$ ; $\gamma$ la conicité, et $2e$ la largeur de la voie ; le chemin parcouru par $R_1$ est :

$$\omega (r + \zeta\gamma)\, dt,$$

et par $R_2$ :

$$\omega (r - \zeta\gamma)\, dt.$$

La roue $R_1$ parcourt donc, en plus de la roue $R_2$, un chemin :

$$2\omega\zeta\gamma dt,$$

et l'angle $\theta$ diminue de la quantité :

$$d\theta = \frac{\omega\gamma}{e}\zeta dt.$$

Ainsi *l'effet de la conicité des bandages est de produire une rotation de l'essieu autour de son milieu, quand les roues roulent parfaitement.*

S'il y a des forces appliquées à l'essieu tendant à le faire tourner autour d'un axe vertical passant par le centre de gravité, mais sans modifier la vitesse de rotation $\omega$, le mouvement de l'essieu sera constitué par une translation dans une direction normale, OA, et par une rotation autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité, laquelle sera la résultante de la rotation due à la conicité des bandages et de la rotation due aux forces appliquées.

Supposons maintenant qu'on ait, comme dans une locomotive, un certain nombre d'essieux solidaires et assujettis à rester parallèles. Ils seront animés d'un mouvement de translation qui sera constamment dirigé suivant la normale à leur direction commune et d'un mouvement de rotation autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité de l'ensemble. Si donc $V = \omega r$ est la vitesse de la locomotive, le centre de gravité se déplacera suivant l'axe de la voie avec une vitesse V cos $\theta$ et suivant l'axe



perpendiculaire avec une vitesse V sin $\theta$. L'angle $\theta$ étant toujours très petit, on peut prendre comme valeur de la première composante : V $(1 - \theta)$ ou simplement V, et comme valeur de la deuxième composante : V$\theta$.

Pour connaître les forces de frottement développées entre les roues et les rails par le mouvement de rotation, il suffit de connaître leur direction, c'est-à-dire celle du glissement élémentaire, car leurs valeurs sont égales au poids adhérent multiplié par le coefficient de frottement, qui n'est autre que le coefficient d'adhérence.

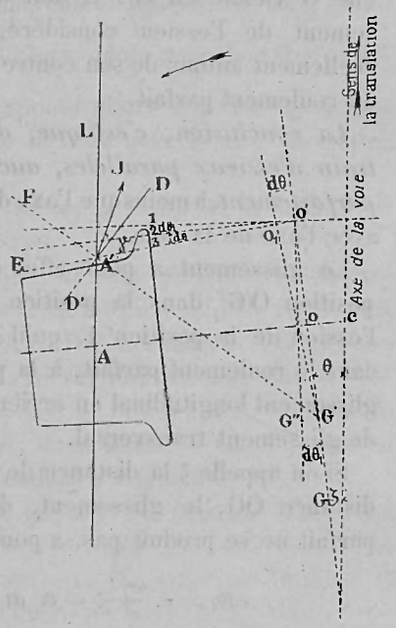


FIG. 4.

Soit (*fig.* 4) G le centre de gravité de la locomotive. Considérons une roue A faisant avec le rail un angle $\theta$, lequel est égal à l'angle que fait l'axe GO de la locomotive avec l'axe de la voie. Supposons que la machine soit animée d'un mouvement de rotation de droite à gauche, et que l'angle $\theta$ augmente de $d\theta$ dans le temps $dt$.

La translation élémentaire se fera suivant l'axe commun à tous les essieux : le centre de gravité G viendra en G′, et le centre O de l'essieu considéré en O′, au bout du temps $dt$. Mais, s'il n'y avait qu'un seul essieu, OA, et qu'il roulât parfaitement, pendant que son centre O viendrait en O′, son axe normal tournerait autour de ce centre d'un

certain angle $d\theta_1$ :

$$d\theta_1 = \frac{\omega\gamma}{e} \times \overline{CO} \times dt,$$

de sorte que le point G, considéré comme un point de l'axe normal à l'essieu, viendrait, non en G', mais en G''. Le fait de la solidarité de plusieurs essieux parallèlles empêche que G vienne en G''. Il doit donc se produire un glissement de l'essieu considéré, puisqu'il n'effectue pas réellement autour de son centre la rotation qui résulterait du roulement parfait.

*La conclusion, c'est que, dans la translation d'un train d'essieux parallèles, aucun d'eux ne peut rouler parfaitement*, à moins que l'axe de la locomotive ne coïncide avec l'axe de la voie.

Le glissement a pour effet de remettre l'axe de la position O'G'' dans la position O'G', ce qui fait passer l'essieu de la position 1, qu'il prendrait, s'il était seul, dans le roulement parfait, à la position 2. Il y a donc un glissement longitudinal en arrière égal à $ed\theta_1$ ; il n'y a pas de glissement transversal.

Si on appelle $\zeta$ la distance de G à l'axe de la voie et $l$ la distance OG, le glissement, dû à ce que le roulement parfait ne se produit pas, a pour valeur :

$$ed\theta_1 = e.\frac{\omega\gamma}{e}(\zeta + l\theta)\,dt = \omega\gamma(\zeta + l\theta)\,dt.$$

Si maintenant l'angle $\theta$ augmente de $d\theta$ par rotation autour de G, l'essieu passe de la position 2 à la position 3, et le point O' vient en $O_1$. Il y aura donc un glissement longitudinal égal à $ed\theta$ et un glissement transversal égal à $ld\theta$.

Les deux composantes du glissement élémentaire sont donc :

| | |
|---|---|
| longitudinalement..... | $e\,(d\theta_1 + d\theta)$ |
| latéralement..... | $ld\theta$. |



La force de frottement J égale à $f$P (P, poids adhérent; $f$, coefficient de frottement) et directement opposée au glissement élémentaire fait avec l'essieu un angle $\mu$, dont la tangente est :

$$\operatorname{tg}\mu = \frac{e\,(d\theta + d\theta_1)}{ld\theta}.$$

La valeur de $\operatorname{tg}\mu$ est maxima lorsque $d\theta$ est très grand par rapport à $d\theta_1$ et est alors égale à $\frac{e}{l}$, d'où il s'ensuit que la force J est alors perpendiculaire à la droite joignant le point de contact A' de la roue avec le rail au centre de gravité.

Lorsque $d\theta = 0$, $\operatorname{tg}\mu = \infty$, $\mu = 90°$ et la force J est dans la direction A'L du rail.

Par conséquent, lorsque $d\theta$ est positif, c'est-à-dire lorsque $\theta$ augmente, la force de frottement de la roue A est comprise dans l'angle DA'L (DA' normale à A'G'), et son moment par rapport à l'axe vertical passant par G' est compris entre $f$P$d$ ($d$ = AG) et $f$P$e$ ($e$, demi-largeur de la voie). Ce moment est, dans tous les cas, opposé au mouvement de rotation tendant à augmenter $\theta$.

Lorsque $\theta$ diminue et que $d\theta$ est négatif, deux cas peuvent se présenter, suivant que $d\theta_1$ est positif ou négatif, c'est-à-dire suivant que le centre de l'essieu se trouve d'un côté ou de l'autre de l'axe de la voie.

Supposons qu'on ait le cas de la *fig.* 4. La valeur de $\operatorname{tg}\mu$ est négative tant que $d\theta$ est plus petit que $d\theta_1$ en valeur absolue, et la force J se trouve dans l'angle EA'L. Lorsque $-d\theta = d\theta_1$, $\operatorname{tg}\mu = 0$, et la force a la direction A'E. Le moment de la force J est favorable à la rotation tant que J se trouve dans l'angle LA'F, et défavorable quand elle est dans l'angle FA'E. Enfin, lorsque $d\theta$ est très grand en valeur absolue, la force de frottement est dirigée suivant A'D'.

Supposons maintenant que $d\theta_1$ soit négatif, c'est-à-dire que la roue roule sur un rayon plus petit que le rayon moyen. La roue $A_1$, opposée à A, doit, pour que l'essieu O conserve son parallélisme avec les autres essieux, glisser en avant d'une quantité $ed\theta_1$. Si, en même temps, l'angle $\theta$ augmente de $d\theta$ vers la gauche, il y a un nouveau glissement en avant, $ed\theta$, et un glissement vers l'intérieur, $ld\theta$. Par conséquent, l'angle $\mu_1$ que fait la force de frottement $J_1$ avec l'essieu est :

$$\operatorname{tg}\mu_1 = -\frac{e(d\theta + d\theta_1)}{ld\theta}.$$

Cet angle $\mu_1$ est égal et de signe contraire à l'angle $\mu$, et les deux forces J et $J_1$ sont alternes par rapport à l'essieu.

Cette conséquence est toujours vraie, quelle que soit l'hypothèse sur la variation de $\theta$.

Pour une position quelconque de la machine, nous connaissons donc toujours la direction des forces de frottements.

En appelant $\beta$ l'angle O'A'G', il est facile de voir que le moment de la force de frottement, J ou $J_1$, par rapport à l'axe vertical passant par G, est :

$$M = fPd\sin(\beta + \mu).$$

Ce moment est nul lorsqu'on a :

$$\beta + \mu = \pi,$$

où :

$$\operatorname{tg}\mu = -\operatorname{tg}\beta,$$

ce qui donne, en remplaçant tg $\mu$ et tg $\beta$ par leurs valeurs :

$$\frac{e(d\theta + d\theta_1)}{ld\theta} = -\frac{l}{e}$$

d'où :

$$d\theta = -\frac{e^2}{d^2}d\theta_1.$$



Lorsque, $\theta$ diminuant, $\beta + \mu$ est plus grand que $\pi$, le moment M favorise le mouvement. Cela a lieu lorsqu'on a :

$$d\theta > -\frac{e^2}{d^2}d\theta_1.$$

Cette condition nous sera très précieuse plus loin pour déterminer le sens de l'action des forces de frottement.

*Résistance due à la pesanteur.* — Quand une roue se déplace latéralement sur la voie, elle monte ou elle descend à cause de la conicité du bandage, ce qui fait naître une force s'opposant au mouvement ou le favorisant.

Si on appelle $P_1$ la charge totale d'une roue, $P_2$ la charge de la roue opposée du même essieu, $\gamma$ la conicité, $l$ la distance de l'essieu au centre de gravité, il est facile de voir que le moment résistant, quand il y a rotation telle que la roue 1 monte, tandis que la roue 2 descend, est :

$$(P_1 - P_2)\gamma l.$$

Ce moment serait nul si les charges des roues étaient égales, ainsi que cela a lieu généralement à l'état statique. Mais, en marche, à cause de l'action des ressorts et de celle des pièces en mouvement relatif, les quantités $P_1$ et $P_2$ peuvent présenter une différence notable. Cependant, comme $\gamma$ est faible $\left(\frac{1}{15}$ pour les machines, $\frac{1}{20}$ pour les wagons$\right)$, le moment ci-dessus est ordinairement petit comparativement au moment des forces de frottement, et il peut être négligé.

# CHAPITRE II.

## MOUVEMENT DE LACET EN ALIGNEMENT ET EN COURBE.

### VI. — Résolution de l'équation générale du mouvement de lacet.

Nous avons établi au § I l'équation du mouvement de rotation du bâti d'une locomotive. Si nous supposons qu'il n'y ait aucun jeu entre les essieux et le bâti, lorsque celui-ci se déplace, il entraîne les essieux à la condition de vaincre les forces de frottement qui se développent au contact des rails et des roues. Par conséquent, le mouvement de rotation de la locomotive tout entière dépend du moment M des forces de frottement et du moment N des efforts exercés par la vapeur sur les longerons. Il ne dépend que d'eux, si nous supposons qu'il n'y ait pas d'autres forces appliquées. Nous négligeons donc, pour le moment, les réactions du tender sur la machine, ce qui revient à admettre que la machine tire le train et que son attelage avec le tender est desserré.

Soit I le moment d'inertie de la locomotive par rapport à l'axe vertical passant par le centre de gravité. L'équation différentielle du mouvement de rotation est :

$$\text{(1)} \qquad I\frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M.$$

En outre, nous savons que le centre de gravité possède un mouvement de translation dirigé suivant l'axe de la locomotive, dont la position est, à chaque instant, variable. Donc, si V est la vitesse de marche, le centre de gravité



se déplace normalement à l'axe de la voie avec une vitesse $V\theta$.

La quantité N est une fonction du temps seulement. M est fonction de la charge des roues (qui, à cause des oscillations des ressorts, varie avec le temps), de l'angle $\theta$ et de sa dérivée $\frac{d\theta}{dt}$. En effet, la valeur de M pour une roue donnée peut s'écrire :

$$M_1 = fP_1 d_1 \sin(\beta + \mu) = fP_1 \frac{l^2 d\theta + e^2(d\theta + d\theta_1)}{\sqrt{l^2 d\theta^2 + e^2(d\theta + d\theta_1)^2}}.$$

C'est une fonction excessivement complexe, et il ne faut pas songer à trouver directement l'intégrale complète de l'équation (1).

Il est seulement possible de trouver la solution de cette équation par des procédés graphiques.

Nous démontrerons plus loin que le moment M reste sensiblement constant, pendant certains intervalles de temps. L'équation (1) pourra, dans cette hypothèse, s'intégrer par de simples quadratures, et on aura :

$$\text{(2)} \qquad I\frac{d\theta}{dt} = I\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_0 + \int_0^t N dt + \int_0^t M dt.$$

$$\text{(3)} \qquad \theta = \theta_0 + I\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_0 t + \int_0^t\int_0^t N dt^2 + \int_0^t\int_0^t M dt^2.$$

Quant au déplacement du centre de gravité normalement à l'axe de la voie, il se déduit de la relation :

$$\frac{d\zeta}{dt} = V\theta$$

d'où :

$$\text{(4)} \qquad \xi = \zeta_0 + \int^t V\theta dt.$$

Les trois équations (2), (3) et (4) permettront de construire

les valeurs de :

$$\frac{d\theta}{dt}, \qquad \theta, \qquad \zeta \qquad \text{et} \qquad \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{\omega\gamma}{e}(\zeta + l\theta).$$

Si donc on parvient à connaître ces quantités en première approximation, il est possible d'en déduire une valeur approchée de M qui sera fonction du temps seulement.

Nous conviendrons de prendre pour origine du temps le moment où on a $\theta = 0$. Pour pouvoir résoudre le problème, il faut connaître quelles sont à ce moment les valeurs possibles de $I\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_0$ et de $\zeta_0$.

La valeur de $\zeta$ pour $t = 0$ est ordinairement très voisine du demi-jeu de la voie $\varepsilon$.

En effet, dans le mouvement de rotation, il arrive, comme nous le vérifierons plus loin, un moment où le boudin de la roue d'avant vient en contact avec le rail. S'il n'y a pas de plan incliné sur cette roue d'avant, permettant le déplacement du bâti indépendamment de celui de l'essieu, la machine se trouve arrêtée, l'angle $\theta$ ne peut plus augmenter, et la distance du centre de l'essieu d'avant à l'axe de la voie reste fixe, égale au demi-jeu de la voie $\varepsilon$. Cette distance a pour valeur :

$$\zeta + l\theta = \varepsilon,$$

relation qui montre que :

1° Pour que $\zeta$ puisse continuer à croître, il faut que $\theta$ diminue ;

2° L'accroissement de $\zeta$ sera, tant qu'il y a contact, égal et de signe contraire à la variation $ld\theta$. La vitesse du centre de gravité sera donc $\frac{d\zeta}{dt} = -l\frac{d\theta}{dt}$, et le contact du boudin avec le rail subsistera tant que la vitesse ordinaire du centre de gravité sera plus grande que celle-ci,



c'est-à-dire tant qu'on aura :

$$V\theta > -l\frac{d\theta}{dt}.$$

A cause de la valeur élevée de V, cette inégalité subsiste tant que $\theta$ a une valeur notable, et le contact ne cesse que lorsque $\theta$ est petit.

On en conclut donc, eu égard à la relation $\zeta + l\theta = \varepsilon$, que, lorsque $\theta$ est voisin de zéro, $\zeta$ est égal à $\varepsilon$.

Lorsque le premier essieu possède un jeu lui permettant de rester fixe, tandis que le bâti continue à se déplacer, le mouvement de rotation se poursuit ordinairement jusqu'à ce qu'il soit arrêté par le contact du deuxième essieu supposé sans jeu et placé en avant du centre de gravité. Le second essieu joue alors le même rôle que le premier, et le raisonnement fait ci-dessus relativement à la valeur de $\zeta$ pour $\theta = 0$ lui est applicable intégralement.

Quant à la valeur de $\frac{d\theta}{dt}$ pour $t = 0$, $\theta = 0$, elle peut être assez différente suivant le type de la locomotive, mais elle est toujours faible. Si cette vitesse est grande, on voit, d'après la valeur de $\operatorname{tg}\rho$ et du moment des forces de frottement, que, à mesure que $d\theta$ augmente, ce moment résistant augmente et se rapproche de son maximum, $\Sigma f P d$. Or, cette valeur maxima est toujours très supérieure au moment N provoquant la rotation. La vitesse ne peut donc dépasser une certaine limite correspondant à une valeur de M du même ordre de grandeur que N.

Supposons, d'autre part, que, pour $\theta = 0$, la vitesse de rotation soit nulle. La machine se trouve alors, tout entière, d'un côté de la voie, puisque son centre de gravité est à la distance $\varepsilon$ de l'axe de la voie, et toutes les forces de frottement donnent un moment $\Sigma f P e$ tendant à incliner l'avant de la machine vers l'intérieur de la voie.

Si le moment N est de même sens, la rotation commence

à s'effectuer avec une vitesse de rotation rapidement croissante. Mais, à mesure qu'elle croît, la valeur positive de M diminue, s'annule et change de signe ; M arrive ainsi à faire équilibre à N et, à partir de ce moment, la vitesse restera sensiblement constante tant que N sera lui-même constant.

Si le moment N est de sens contraire, la rotation ne s'effectuera pas tant qu'on aura $N > \Sigma\, fPe$. Elle commencera dès qu'on aura l'inégalité contraire, avec une vitesse croissante jusqu'à ce que, M diminuant, on ait $M = N$.

Quand on étudie le mouvement de rotation en première approximation, il est toujours suffisamment exact de supposer que, pendant la durée d'un tour de roue, N a deux valeurs constantes, l'une positive, l'autre négative. Si, en effet, on fait la quadrature de la courbe N (*fig.* 5, Pl. IV), en prenant pour origine le moment où N devient positif, on s'aperçoit que la courbe $N' = \int_0^t N\, dt$ (*fig.* 9, Pl. IV) se compose d'une branche ascendante et d'une branche descendante qui se confondent chacune, sensiblement, avec une droite. Ainsi, N pouvant être considéré comme constant, M doit l'être également et, comme pendant chaque intervalle de temps où N est constant la position angulaire et par suite $\frac{d\theta_1}{dt}$ n'ont pas le temps de varier beaucoup, la vitesse angulaire $\frac{d\theta}{dt}$ est elle-même constante.

Pour trouver rapidement cette vitesse, il faut construire des abaques donnant pour chaque essieu les valeurs de M en fonction de $\frac{d\theta_1}{dt}$ et de $\frac{d\theta}{dt}$. Dans ces abaques, les isoplèthes, c'est-à-dire les courbes ayant pour équation :

$$M = \varphi\left(\frac{d\theta_1}{dt}, \frac{d\theta}{dt}\right) = C^{te}$$



sont des lignes droites. En effet, le seul élément variable dans la valeur :

$$M = fPd \sin(\mu + \beta),$$

en admettant pour le moment que P reste constant, est l'angle $\mu$ qui a pour tangente:

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{e}{l} \frac{d\theta_1 + d\theta}{d\theta}.$$

L'angle $\mu$ est donc constant et, par suite, M l'est également, lorsque le rapport $\frac{d\theta_1}{d\theta}$ l'est lui-même. En prenant pour coordonnées les valeurs de $\frac{d\theta_1}{dt}$ et de $\frac{d\theta}{dt}$, les courbes :

$$M = C^{te},$$

sont des droites passant par l'origine des coordonnées.

Cette remarque rend très facile la construction et la lecture des abaques. Connaissant les valeurs de $\frac{d\theta_1}{dt}$ pour chaque essieu, on trouve rapidement quelle est la valeur que doit avoir la vitesse de rotation pour que $M = N$.

On construit ainsi en première approximation les valeurs de $\frac{d\theta}{dt}$, $\theta$ et $\zeta$. S'il y a intérêt à pousser plus loin les calculs, on se sert de ces dernières valeurs pour calculer M et on peut alors tenir compte de la variation de P due aux oscillations du poids suspendu sur les ressorts. Du reste, comme ces oscillations sont ordinairement très rapides, elles n'ont que peu d'influence sur le mouvement de rotation proprement dit ; mais elles en ont une très grande, comme nous le verrons plus tard, sur les circonstances qui accompagnent le contact des boudins des roues avec les rails.

En résumé, l'intégration graphique de l'équation (1) est toujours possible par approximations successives.

Cette analyse nous conduit à expliquer comment et dans quel sens peut prendre naissance le mouvement du lacet.

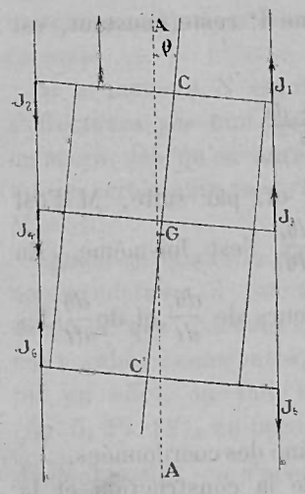


Fig. 5.

Considérons (*fig.* 5) une machine, à 3 essieux par exemple, placée sur la voie de façon que son axe CC′ fasse avec l'axe de la voie un angle θ, si petit soit-il, et que les centres des deux essieux d'avant soient à droite, le centre de l'essieu d'arrière à gauche de l'axe de la voie.

Cette position, dans laquelle la machine fait un angle avec l'axe de la voie, est la plus probable, car, à cause des inégalités de la voie, des différences, accidentelles ou non, de hauteur des deux files de rails, la position conaxiale de la locomotive sur la voie doit être considérée comme exceptionnelle.

Supposons donc que la machine occupe une position angulaire quelconque. Nous savons que les roues ne peuvent pas rouler parfaitement, en dehors de la position conaxiale, et qu'elles développent des forces de frottement à leur contact avec le rail. Si l'angle θ ne varie pas, ces forces : $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6$, sont parallèles à la voie, et leur moment par rapport à l'axe vertical passant par le centre de gravité est $\Sigma f P e$.

Ce moment peut être positif, c'est-à-dire tendre à faire tourner de droite à gauche, auquel cas l'angle θ doit diminuer; ou négatif, auquel cas θ doit augmenter. Mais, à mesure que la vitesse de rotation dans un certain sens



augmente, le moment favorable diminue, et le moment défavorable augmente, ce qui tend à diminuer l'accroissement de cette vitesse. Celle-ci doit donc tendre vers une valeur limite.

Quand il y a un moment N des forces appliquées, le sens de la rotation est également déterminé. Le moment total, dans l'hypothèse où θ ne changerait pas, serait : $N + \Sigma f P e$. Suivant que cette somme est positive ou négative, la rotation a lieu dans un sens ou dans l'autre. Si elle est nulle pendant un certain temps, l'angle θ reste momentanément constant.

Sous l'influence seule des moments N et M, la position angulaire d'une machine ne pourrait varier que très lentement, parce que, dès que la vitesse s'accroît, le moment M est résistant et devient vite beaucoup plus grand que N. Mais ce qui fait qu'une locomotive se transporte d'une file de rails sur l'autre, en décrivant une sorte de sinusoïde allongée, c'est qu'elle est animée d'une vitesse V0 normale à la voie et que V acquiert dans la pratique des valeurs élevées. Dans ce déplacement latéral, il arrive donc que les boudins des roues d'avant rencontrent les rails et exercent sur eux des chocs et des réactions par suite desquels le sens du mouvement se trouve changé.

## VII. — **Contact des mentonnets avec les rails. Chocs sur les rails.**

Le mouvement de rotation d'une locomotive à empattement rigide est limité par le jeu de la voie. Il faut donc connaître à quel moment le contact des mentonnets avec les rails se produit et les divers effets auxquels il donne naissance.

Si nous partons de la position $\theta = 0$, $\zeta = \varepsilon$, à droite, la déviation commence vers la gauche, et l'angle θ que fait l'axe de la machine avec l'axe de la voie va en augmen-

tant, en même temps que diminue la distance $\zeta$ du centre de gravité à l'axe. Il arrive un moment où $\zeta$ devient nul et augmente ensuite de l'autre côté. Bien qu'à ce moment $\theta$ commence généralement à diminuer, cette diminution n'est pas assez rapide pour compenser l'augmentation de $\zeta$, pour peu que la vitesse de marche V soit un peu grande; toute la machine se trouve donc portée sur la gauche, et le boudin de la roue gauche d'avant vient, à un moment donné, en contact avec le rail. La quantité dont l'essieu d'avant s'est déplacé par rapport à sa position moyenne, pour laquelle son centre coïncide avec l'axe de la voie et les boudins sont à une distance des rails égale au demi-jeu de la voie $\varepsilon$, est :

$$\zeta + l_1\theta.$$

Il y a contact avec le rail lorsque $\zeta + l_1\theta = \varepsilon$.

D'après les courbes donnant $\zeta$ et $\theta$, on reconnaît facilement à quel moment cette condition est remplie.

Le contact avec le rail a pour effet d'arrêter brusquement le mouvement de la machine. Il se produit donc un choc.

Avant le contact, la machine est animée: 1° d'une vitesse de rotation positive ou négative; 2° d'une vitesse de translation latérale $V\theta$ toujours positive. Après le choc, la vitesse de translation latérale n'est plus $V\theta$, mais $l_1\frac{d\theta}{dt}$, $\frac{d\theta}{dt}$ étant une nouvelle vitesse de rotation qu'il s'agit de déterminer.

Si la voie est parfaitement élastique, le choc a pour premier effet de changer de signe la vitesse de rotation, au cas où celle-ci est auparavant positive. On connaît donc après le choc la vitesse $\theta'_r$ due à la rotation.

En second lieu, la vitesse de translation latérale diminue de la quantité $V\theta - l_1\frac{d\theta}{dt}$, par suite du choc s'exerçant à la distance $l_1$ du centre de gravité. En vertu d'un principe



de mécanique, ce choc a pour effet de provoquer un accroissement de vitesse angulaire et, par suite, de la quantité de mouvement, accroissement dont le moment est égal au moment de l'impulsion de la percussion. Soit $\theta'_t$ cet accroissement de vitesse angulaire. Le moment de l'accroissement de la quantité de mouvement est: $I\theta'_t$, et il est égal au moment de l'impulsion de la percussion. Cette impulsion est elle-même égale à la quantité de mouvement perdue, c'est-à-dire à : $\frac{\Pi}{g}\left(V\theta - l_1\frac{d\theta}{dt}\right)$, $\Pi$ étant le poids total de la machine. Or, la vitesse angulaire après le choc, $\frac{d\theta}{dt}$, est égale à $\theta'_r + \theta'_t$. Le moment de l'impulsion de la percussion est donc :

$$l_1\frac{\Pi}{g}[V\theta - l_1(\theta'_r + \theta'_t)],$$

et on a :

$$I\theta'_t = l_1\frac{\Pi}{g}[V\theta - l(\theta'_r + \theta'_t)]$$

d'où on tire l'inconnue $\theta'_t$.

Si la voie n'est pas parfaitement élastique et qu'elle se déforme plus ou moins sous l'action de la percussion, la vitesse de rotation, après le choc, est moindre que celle calculée ci-dessus. A la limite, toute la force vive latérale que possède la machine peut être transformée en un travail de désagrégation de la voie, et, dans ce cas, la vitesse de rotation due au choc est nulle. L'impulsion de la percussion que subit la voie est alors maxima, et, si $\theta'_r = 0$, elle est égale à $\frac{\Pi}{g}V\theta$, c'est-à-dire proportionnelle au poids de la machine, à la vitesse et à l'obliquité que la locomotive prend sur la voie. Cette percussion, *qui acquiert des valeurs très considérables*, tend à provoquer la déformation permanente, la rupture, le déversement des rails, l'arrachement des attaches, le ripement

de la voie. Une voie en bon état doit être capable de résister, sans déformation, à la percussion ci-dessus.

### VIII. — Équation du mouvement pendant le contact des mentonnets avec les rails.

Le mouvement de rotation est forcément renversé après le choc sur le rail, s'il ne l'est déjà, et $\theta$ ne peut que diminuer ; $\zeta$ continue d'augmenter en satisfaisant à la relation : $\zeta + l\theta = \varepsilon$ ; d'où : $\frac{d\zeta}{dt} = -l\frac{d\theta}{dt}$. Lorsque la machine est libre, $\frac{d\zeta}{dt} = V\theta$. Trois cas peuvent donc se présenter, puisque $V\theta$ peut se trouver inférieur, égal ou supérieur à $-l\frac{d\theta}{dt}$.

Si $V\theta < -l\frac{d\theta}{dt}$, l'essieu d'avant s'éloigne du rail plus vite que le centre de gravité de la machine ne s'en rapproche, et le contact du boudin avec le rail cesse immédiatement après le choc. Le mouvement de la machine continue alors à s'effectuer librement en sens inverse.

Si $V\theta = -l\frac{d\theta}{dt}$, le contact avec le rail dure pendant un certain temps, mais le rail n'exerce aucune réaction sur le boudin. Cette égalité donne la loi de variation de $\theta$ et, en intégrant, on trouve :

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{V}{l}t}.$$

Enfin, lorsque $V\theta > -l\frac{d\theta}{dt}$, le mouvement de la machine n'est plus libre, et le rail exerce sur le boudin de la roue en contact une réaction qui a pour effet de réduire la vitesse de translation latérale de la machine. Nous



devons tenir compte de cette réaction, si nous voulons continuer à considérer le mouvement de notre machine comme étant la résultante d'une translation latérale du centre de gravité et d'une rotation autour de l'axe passant par ce centre.

Mais nous pouvons aussi envisager le mouvement d'une autre façon, comme étant simplement une rotation, sans translation latérale, autour du centre de l'essieu d'avant, dont les boudins des roues sont en contact avec les rails, centre qui, par conséquent, reste fixe. Les forces appliquées seront, comme précédemment, celle agissant sur les longerons, dont le moment est N, et les forces de frottement, dont la direction est, d'ailleurs, modifiée, comme nous le verrons plus loin, et dont le moment est $M_1$ ; d'ailleurs, il n'y a pas lieu de tenir compte de la force d'inertie d'entraînement longitudinal, l'angle $\theta$ étant toujours très petit.

Ainsi, $I_1$ étant le moment d'inertie de la locomotive par rapport à l'axe vertical passant par le centre de l'essieu d'avant, l'équation du mouvement de rotation sera :

$$I_1 \frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M_1. \qquad (1\ bis)$$

On sait, d'ailleurs, que le moment d'inertie $I_1$ est égal au moment d'inertie I par rapport à l'axe vertical du centre de gravité augmenté du produit de la masse $\frac{\Pi}{g}$ de la machine par le carré de la distance, $l$, du centre de gravité au centre de l'essieu d'avant ; donc :

$$I_1 = I + \frac{\Pi}{g} l^2.$$

L'équation (1 *bis*) est appliquable tant que la condition

$$V\theta > -l\frac{d\theta}{dt}$$

se trouve vérifiée.

Voyons maintenant quelles sont les forces de frottement. Elles n'ont plus les mêmes directions que précédemment, parce que la translation latérale de la machine n'est plus libre.

Pour rendre leur étude plus claire, considérons de nouveau le cas élémentaire d'un rouleau se déplaçant sur un plan. Ce rouleau est supposé animé d'une vitesse de rotation uniforme ; il s'avance donc sur le plan par roulement simple dans un sens normal à son axe.

Supposons que, en se déplaçant, ce rouleau vienne rencontrer une saillie en ligne droite, AB, faisant un angle $\theta$ avec la direction suivie par le rouleau. Celui-ci continuera évidemment à avancer, non plus normalement à son axe, mais dans la direction AB. Il ne roulera plus parfaitement; il glissera dans la direction normale à AB, et la saillie exercera sur lui une réaction précisément égale à la force de frottement développée par ce glissement.

Le cas d'une locomotive se déplaçant sur les rails est exactement le même, si on ne considère que les déplacements élémentaires. Quand le boudin d'une des roues d'avant est en contact avec le rail, la machine, au lieu de se déplacer normalement à la voie d'une quantité $V\theta dt$, comme elle le ferait si elle était libre, ne se déplace que d'une quantité : $-l\frac{d\theta}{dt}dt$. Il y a donc un glissement normal à la voie de toute la machine, et sa valeur est :

$$\left(V\theta + l\frac{d\theta}{dt}\right)dt.$$

D'autre part, le mouvement de rotation autour du centre de gravité engendre des glissements dont nous avons établi plus haut la valeur et qui sont :

| | |
|---|---|
| latéralement..... | $-ld\theta$. |
| longitudinalement..... | $e\,(d\theta_1 - d\theta)$. |



Le glissement élémentaire qui donne la direction de la force de frottement est la résultante de ces trois glissements, et l'angle $i$ que fait cette force avec la direction de l'essieu a pour tangente :

$$\operatorname{tg} i = \frac{e\,(d\theta_1 - d\theta)}{-ld\theta + \left(V\theta + l\frac{d\theta}{dt}\right)dt} = \frac{e\,(d\theta_1 - d\theta)}{V\theta dt}.$$

Il est, d'ailleurs, facile de voir que les forces de frottement des deux roues d'un même essieu sont, comme avant, alternes par rapport à la direction de l'essieu, c'est-à-dire donnent une résultante parallèle à l'essieu.

Le dénominateur $V\theta$ a une valeur beaucoup plus grande que le numérateur, sauf vers la fin du contact, car alors il tend rapidement vers : $-l\frac{d\theta}{dt}dt$. Par conséquent, pendant la plus grande partie de la durée du contact, l'angle $i$ est très petit, et la direction de la force de frottement se confond sensiblement avec celle de l'essieu.

Il en résulte que, dans une machine à empattement rigide total :

1° Le moment M des forces de frottement, par rapport au centre de gravité, est nul, puisque : $M = \Sigma f P l$ et que $\Sigma\, Pl = 0$ ;

2° La résultante F des forces de frottement, toutes parallèles et de même sens, est égale à leur somme et a pour valeur le poids total de la machine multiplié par le coefficient de frottement, soit $f\Pi$;

3° Le moment $M_1$ des forces de frottement par rapport au centre du premier essieu est égal à la somme du moment des forces de frottement par rapport au centre de gravité et du moment de la résultante par rapport au centre du premier essieu. On a ainsi : $M_1 = M + lF$.

### IX. — Réaction des mentonnets sur les rails.

Cherchons maintenant quelle est la réaction X qu'exerce le rail sur le boudin en contact.

En vertu du principe de d'Alembert, il y a équilibre entre la force de liaison X, les forces appliquées et les forces d'inertie. Pour connaître la valeur de X, il nous suffit d'écrire que la somme de la projection des forces sur un axe normal à la voie est nulle.

Ces forces se réduisent, en dehors de la réaction X, aux forces de frottement dont la résultante, normale à la voie, est F et aux forces d'inertie, dont la projection sur l'axe normal à la voie est, comme il est facile de le voir, égale à : $-\frac{\Pi}{g} l \frac{d^2\theta}{dt^2}$.

On a donc :

$$X = F - \frac{\Pi}{g} l \frac{d^2\theta}{dt^2}. \tag{5}$$

On peut aussi déduire cette relation de l'équation (1 *bis*), qui peut s'écrire, en remplaçant $I_1$ par $I + \frac{\Pi}{g} l^2$ et $M_1$ par $M + lF$ :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M + lF - \frac{\Pi}{g} l^2 \frac{d^2\theta}{dt^2}.$$

Or, l'équation du mouvement relatif de rotation par rapport à l'axe vertical passant par le centre de gravité est :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M + lX.$$

En identifiant ces deux équations, on en déduit la relation (5).

On connaît donc la composante horizontale X de la réaction du mentonnet sur le rail. Cette réaction joue un rôle



considérable au point de vue de la tendance au déraillement, et il importe beaucoup d'en connaître le maximum.

Considérons une machine à empattement rigide total. Remplaçons dans (5) $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ par sa valeur tirée de (1 *bis*). Il vient :

$$X = F \frac{I}{I_1} - \frac{\Pi}{g} \frac{l}{I_1} (N + M).$$

Comme nous l'avons vu plus haut, la valeur F est sensiblement égale au poids de la machine multiplié par le coefficient d'adhérence, et la valeur de M est sensiblement nulle.

Par suite, si on suppose que N ait une valeur négative, c'est-à-dire tende à appliquer le boudin contre le rail et si on remplace, dans la valeur de X, N par — N, la valeur maxima de X sera donnée par l'équation suivante, où les deux termes sont positifs :

$$X = f\Pi \frac{I}{I_1} + \frac{\Pi}{g} \frac{l_1}{I_1} N.$$

ou bien :

$$X = f\Pi \frac{I}{I_1} + \frac{1}{l_1} \left(1 - \frac{I}{I_1}\right) N.$$

On peut trouver la valeur de $l_1$ pour laquelle X est maximum, toutes les autres quantités restant constantes. Il suffit d'égaler à zéro la dérivée du second membre par rapport à $l_1$, ce qui conduit à une équation du second degré, dont une seule racine convient à la question. Du reste, le premier terme de X étant d'ordinaire plus grand que le second, il est visible que X diminue quand le rapport $\frac{I}{I_1}$ diminue, c'est-à-dire quand l'empattement rigide augmente.

La valeur de X croît, comme on le voit, avec N, et c'est dans cette intervention de N que consiste l'influence principale qu'exerce sur la stabilité le mode d'emploi et

d'action de la vapeur. N acquiert des valeurs importantes, surtout dans les locomotives à cylindres extérieurs et dépend essentiellement du timbre des chaudières. Or, la tendance générale, pour augmenter la puissance des machines et aussi leur rendement, est d'augmenter ce timbre; on diminue du même coup la stabilité. Pour la conserver bonne dans les locomotives à cylindres extérieurs, il faut forcément limiter le timbre des chaudières, et l'emploi des hautes pressions n'est pratiquement réalisable, au seul point de vue de la stabilité (car d'autres raisons militent également en faveur de cette thèse), qu'avec des locomotives à cylindres intérieurs ou, mieux, des locomotives compound, ou encore des locomotives à bogie, car nous verrons plus loin que les bogies atténuent et même parviennent à supprimer les réactions exercées sur la voie; dans ces dernières machines, les cylindres peuvent alors être extérieurs.

La présence de Π, poids de la machine, dans l'expression de X, comme aussi dans celle qui donne la valeur du choc au moment du contact (§ VII), montre combien est désastreuse l'augmentation du poids des machines à grande vitesse, l'action désorganisatrice exercée sur la voie étant proportionnelle à Π.

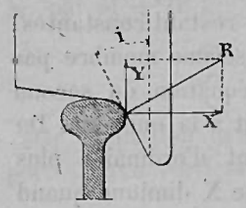


Fig. 6.

Il est à remarquer que X n'est que la projection horizontale de la réaction du boudin sur le rail. Un boudin de profil normal présente ordinairement une inclinaison de $\frac{1}{5^e}$ par rapport à la verticale. Il est probable que la réaction R du boudin sur le rail (*fig.* 6) s'exerce normalement aux surfaces en contact, d'où il résulte que :

$$R = \frac{X}{\cos i},$$



et qu'il y a une composante verticale Y, dont la valeur est :

$$Y = X \operatorname{tg} i = \frac{1}{5} X.$$

En outre, pour que la roue puisse tourner, le boudin frottant sur le rail, elle doit vaincre une force de frottement, $f'R$, dont la composante verticale est :

$$Y_1 = f' R \cos i = f' X.$$

Ainsi le contact du boudin avec le rail produit une réaction verticale, $Y + Y_1$, tendant à soulever la roue, et dont la valeur est :

$$Y + Y_1 = X (f' + \operatorname{tg} i).$$

La valeur de X est d'autant plus grande que le coefficient d'adhérence, $f$, est plus grand et la valeur de $Y + Y_1$ augmente quand $f'$, coefficient de frottement du boudin sur le rail, augmente. Ordinairement les deux coefficients $f$ et $f'$ sont les mêmes; il n'en est plus ainsi lorsque les boudins des roues sont graissés, ce qui a lieu parfois; $f'$ est alors beaucoup plus petit que $f$, et la force $Y + Y_1$ est notablement diminuée.

Lorsque la valeur de $Y + Y_1$ est plus grande que le poids de la roue et de sa charge (mesurée par la tension du ressort), $P + p$, la roue se met à monter sur le rail et peut dérailler. Mais il faut un certain temps pour que la jante du boudin vienne affleurer au niveau supérieur du rail, et le déraillement n'a réellement lieu que si, pendant cette durée de l'ascension du boudin, on a $Y + Y_1 > P + p$.

Ainsi, pour que le déraillement puisse se produire, il faut deux conditions principales :

1° Qu'il y ait coïncidence entre le moment où le boudin de la roue entre en contact avec le rail, en produi-

sant la réaction $Y + Y_1$ et le moment où la charge totale de la roue $P + p$ est plus petite que $Y + Y_1$;

2° Que l'inégalité $P + p < Y + Y_1$ subsiste un temps suffisant pour que le boudin ait le temps de monter sur le rail.

C'est cette dernière condition qui doit se produire le plus rarement, car $Y + Y_1$ diminue très vite, et $P + p$ augmente très vite également, d'autant plus vite que, à mesure que la roue s'élève, le ressort se comprime, et P augmente de ce seul fait, indépendamment de l'action du poids suspendu. Mais elle peut être facilitée par des causes étrangères, par exemple par une dénivellation brusque de la voie, car, lorsqu'une roue tombe, même d'une hauteur excessivement faible, elle cesse d'adhérer au rail sur une certaine longueur, d'autant plus appréciable que la vitesse est plus grande.

Quant à la possibilité d'avoir $Y + Y_1 > P + p$, elle est certaine, tout au moins pour un grand nombre de types de locomotives, qu'il n'est pas dans notre intention d'énumérer ici. Avec une bonne adhérence, $f = f' = \frac{1}{5}$, la valeur X peut atteindre 7.000 à 8.000 kilogrammes (quelquefois davantage), et la valeur $Y + Y_1$, 2.500 à 3.000 kilogrammes. Or, la charge totale $P + p$ peut, comme nous l'avons vu dans notre mémoire sur les oscillations des ressorts, se réduire à $p$, poids propre de la roue, variant de 1.000 à 1.500 kilogrammes.

Il résulte de ce qui précède que c'est lorsque l'adhérence est bonne qu'il y a le plus de tendance au déraillement. Cette tendance est fort diminuée par le graissage des boudins, ce qui a pour effet d'abaisser le coefficient $f'$.

Ce que nous venons de dire s'applique principalement aux machines dont l'empattement rigide comprend tous les essieux. Lorsque l'essieu d'avant présente un jeu par rapport au bâti, la façon dont il se comporte varie avec



la nature de ce jeu. Nous allons étudier cette question dans le paragraphe suivant.

### X. — **Influence des jeux des essieux.**

Ordinairement, les essieux d'une locomotive restent toujours parallèles, mais il y a des jeux qui permettent un certain déplacement transversal. Dans les machines à voyageurs à deux essieux couplés, les essieux moteurs n'ont aucun jeu; les essieux porteurs en possèdent toujours et sont munis, d'habitude, de plans inclinés. Dans les machines à trois essieux, tous moteurs, l'essieu d'avant est souvent muni de plans inclinés. Les divers jeux sont, en résumé, les suivants :

Jeux des fusées dans les coussinets, toujours très faibles, 2 à 3 millimètres, quand il y des plans inclinés; quand il n'y en a pas, ils peuvent atteindre 5 à 6 millimètres;

Jeu des plans inclinés, dont l'inclinaison est de $\frac{1}{10^e}$ ou de $\frac{1}{15^e}$. Il peut atteindre de 15 à 20 millimètres de chaque côté et permet, par suite, un déplacement relativement considérable du centre de l'essieu par rapport à l'axe de la locomotive. Les surfaces frottantes sont graissées et nous admettrons que le coefficient de frottement, le même que celui des coussinets sur les fusées, est d'environ $\frac{1}{20^e}$.

Lorsque le bâti d'une locomotive prend un mouvement de rotation autour de son centre de gravité propre, il peut se faire, si un essieu a du jeu, que le bâti n'entraine pas cet essieu dans son mouvement. Cela arrivera si la résistance à vaincre pour déplacer l'essieu est plus grande que la résistance à vaincre pour déplacer le bâti sur l'essieu. Il faut donc comparer ces deux résistances.

La première a pour valeur, comme nous l'avons vu plus haut, le produit de la charge totale de l'essieu, y compris son poids propre, $P_1 + P_2$, par le coefficient d'adhérence $f$, et son moment maximum par rapport à l'axe vertical du centre de gravité est : $f(P_1 + P_2)d$, $d$ étant la distance du point de contact de la roue à la projection du centre de gravité de la locomotive sur le plan de la voie.

La résistance à vaincre pour faire jouer le plan incliné comprend la force nécessaire pour soulever le bâti d'une certaine quantité et la force de frottement. Soient $P'_1$, $P'_2$, les charges qui portent sur chacun des plans inclinés. L'inclinaison de ceux-ci étant supposée de $\frac{1}{10}$, pour faire monter le poids $P'_1 + P'_2$ sur les plans, il faut exercer horizontalement un effort égal à : $\frac{1}{10}(P'_1 + P'_2)$.

Quant à la force de frottement, elle est égale à $f'(P'_1 + P'_2)$, $f'$ étant le coefficient de frottement. La résistance totale est donc :

$$\left(\frac{1}{10} + f'\right)(P'_1 + P'_2),$$

et son moment, par rapport à l'axe vertical du centre de gravité de la locomotive moins l'essieu d'avant, situé à la distance $l_1$, est :

$$l_1\left(\frac{1}{10} + f'\right)(P'_1 + P'_2).$$

Ce n'est pas tout. Si le bâti n'entraîne pas l'essieu dans le sens normal à la voie, il n'en modifie pas moins sa position angulaire, puisque tous les essieux restent constamment parallèles, ce qui produit un déplacement des roues dans le sens longitudinal et, par suite, un glissement, si ce déplacement est de direction opposée à celui qui correspond au roulement parfait ou si, étant de même sens, il



ne lui est pas rigoureusement égal. On ne peut, d'ailleurs, procéder à cette comparaison que, *a posteriori*, en faisant la construction de 0. Ordinairement il y a un glissement produisant une force opposée au mouvement, qui s'ajoute à la résistance propre du plan incliné. Cette force, dirigée suivant le rail, a pour valeur : $f(P_1 + P_2)$ et pour moment : $f(P_1 + P_2)e$.

Par conséquent, le fonctionnement du plan incliné produit un moment résistant total $M'_1$ :

$$M'_1 = \left(\frac{1}{10} + f'\right)(P'_1 + P'_2) \pm f(P_1 + P_2)e.$$

Ce moment peut être plus grand ou plus petit que le moment $f(P_1 + P_2)d_1$, maximum du moment M des forces de frottement des roues sur les rails. Il n'en diffère ordinairement pas beaucoup, et deux cas peuvent alors se présenter.

*Premier cas.* — Supposons d'abord que, à partir de la position $\theta = 0$, l'axe de la machine s'infléchissant vers l'intérieur de la voie, le plan incliné ne fonctionne pas, sa résistance étant plus grande que le frottement des roues. Le mouvement de rotation s'effectue, suivant le cas général traité plus haut, jusqu'à ce que se produise le contact du boudin de la roue d'avant avec le rail opposé. A ce moment, l'essieu d'avant s'arrête brusquement dans son mouvement, mais le mouvement latéral de la locomotive continue dans le même sens, parce que le plan incliné se met à fonctionner et, pour le déterminer, il suffit de substituer, dans l'équation générale, au moment $M_1$, le moment $M'_1$.

Il y a continuité de mouvement et le choc de l'essieu d'avant sur le rail est relativement faible, puisqu'il ne dépend que de la masse de cet essieu. La réaction du

boudin sur le rail est d'ailleurs égale à :

$$\left(\frac{1}{10} + f'\right)(P'_1 + P'_2).$$

Le mouvement ultérieur, qui s'effectue autour d'un nouveau centre de gravité et dépend d'un nouveau moment d'inertie, d'ailleurs peu différents l'un et l'autre des premiers, présente des circonstances diverses suivant le type de la locomotive.

Si le plan incliné joue jusqu'à la limite de son jeu, avant que la roue du deuxième essieu soit venue au contact du rail, le mouvement continue comme si le premier essieu faisait partie de l'empattement rigide, et on rentre absolument dans le cas traité dans les paragraphes précédents. On peut dire qu'alors le plan incliné ne remplit pas son rôle.

Il n'en est pas ainsi ordinairement, pourvu que le plan incliné ait une pente et un déplacement convenables. Dans ce cas, le boudin de la roue du second essieu (supposé en avant du centre de gravité) vient en contact avec le rail avant que le plan incliné ait épuisé son jeu et, du fait de ce contact, le mouvement se trouve renversé. Les circonstances qui se produisent alors, en ce qui concerne le second essieu, sont entièrement analogues à celles déjà étudiées pour le premier essieu. Mais la réaction X sur le rail est beaucoup moins grande que lorsque le contact s'effectue par les boudins des roues d'avant seulement, parce que la réaction du plan incliné vient en déduction des forces de frottement F.

Enfin, il peut se faire que le mouvement de rotation change naturellement de sens avant que le plan incliné n'ait épuisé son jeu et sans qu'il y ait contact des boudins du second essieu avec les rails. Dans ce cas, il n'y a ni chocs sur les rails, ni réactions, si ce n'est celles, toujours assez faibles, provenant des plans inclinés et s'exerçant



entre les boudins d'avant et les rails. On se trouve alors dans les meilleures conditions possibles de stabilité. Ce cas se présente dans certaines machines à bogie ; nous l'étudierons plus loin.

*Deuxième cas.* — Supposons maintenant que, à partir de la position $\theta = o$, le plan incliné fonctionne. Le mouvement s'étudiera, comme dans le cas général, en introduisant le moment $M'_1$ à la place du moment M. L'essieu d'avant ne commencera à être entraîné dans le mouvement du bâti que lorsque le jeu du plan incliné sera épuisé, et le mouvement continuera ensuite comme si l'essieu d'avant était compris dans l'empattement rigide. Le jeu produit par le plan incliné n'offre donc alors aucune efficacité au point de vue du mouvement de lacet et des réactions sur la voie qui en résultent.

C'est dans cette deuxième hypothèse que rentre le cas des machines non munies de plans inclinés, mais où un certain déplacement de l'essieu d'avant par rapport au bâti est permis par un jeu entre les fusées et les coussinets. Alors, en effet, la résistance à vaincre pour déplacer le bâti sur l'essieu est toujours moindre que la force provenant du frottement des roues sur les rails. Ce système de jeu, peut-être suffisant pour la circulation dans les courbes, ne présente aucune espèce d'efficacité au point de vue du mouvement de lacet ; il est plutôt nuisible, au contraire, puisque la déviation $\theta$ de la machine prend plus d'amplitude.

En résumé, l'étude du mouvement de lacet, en tenant compte du jeu des plans inclinés et des autres jeux, s'il en existe qui aient une valeur appréciable, n'exige pas des procédés autres que ceux que nous avons fait déjà connaître.

## XI. — Machines munies d'essieux convergents ou de bogies.

Pour faciliter l'inscription des locomotives dans les courbes, on a depuis longtemps songé à munir les essieux porteurs d'appareils leur permettant de prendre une position radiale et, par suite, de cesser d'être parallèles aux essieux moteurs. Les bogies ou avant-trains à deux essieux sont également destinés à remplir ce but, mais ils présentent en plus d'autres avantages. Ils se plient mieux que les essieux rigides aux déformations de la voie, ils diminuent les oscillations du bâti sur les ressorts, enfin, et surtout, comme nous le démontrerons plus loin, ils atténuent et même suppriment les réactions que les machines font supporter à la voie par suite de leur mouvement de lacet.

Nous nous occuperons principalement des bogies, en considérant les essieux convergents uniques comme des cas particuliers des bogies.

Le bogie est un avant-train articulé autour d'un pivot central. Plusieurs types de bogie sont en usage. Dans tous, le bogie peut prendre un mouvement de rotation autour du pivot ; dans quelques-uns, tels que les bogies américains, ceux des Compagnies de Lyon et de l'Ouest, le pivot et, par suite, le bâti de la machine peuvent, en outre, se déplacer transversalement par rapport au bogie. Dans tous les cas, l'axe longitudinal du bogie est toujours ramené sur l'axe de la machine par des dispositifs de rappel soit longitudinaux, soit latéraux. La mobilité relative du bogie est, en effet, une chose très précieuse, mais il faut redouter de l'exagérer, parce que la tendance au chauffage des fusées et des autres parties frottantes s'en trouve augmentée.

Nous allons étudier le mouvement de lacet des machines à bogie et, d'abord, les forces de frottement qui se développent au contact des roues et des rails.



Comme on l'a vu plus haut, quand on considère un essieu O, celui d'avant par exemple, d'une machine à empattement rigide (*fig.* 7), cet essieu est sollicité par des forces de frottement $J_1$, $J'_1$, qui, si l'essieu est maintenant supposé mobile autour de son centre O, donnent un certain moment de rotation, $M'_1$, tendant à faire tourner l'essieu autour de O. Quand cette rotation peut avoir lieu effectivement, il y a toujours un dispositif de rappel qui la contrarie et qui donne un moment de rotation $L_1$ opposé à $M'_1$. Tant que $M'_1 > L_1$ la déviation augmente, et l'essieu

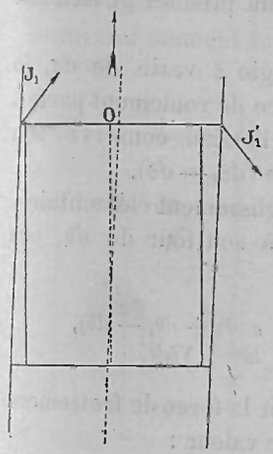



Fig. 7.

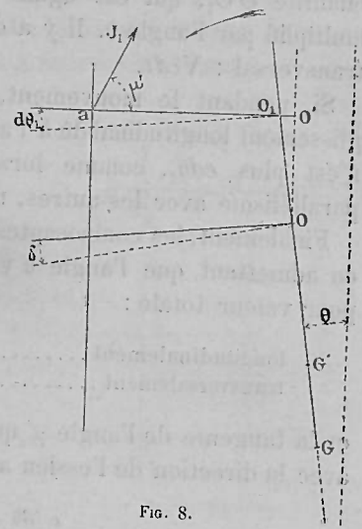



Fig. 8.

arrive ainsi jusqu'à une position angulaire pour laquelle on a : $M'_1 = L_1$. Le moment $L_1$ peut être constant ou variable, suivant la nature du rappel. Ordinairement $L_1$ croît avec la déviation de l'essieu.

Il s'agit, d'autre part, de savoir si $M'_1$ augmente ou diminue avec cette déviation ; il faut donc étudier quelles sont alors les forces de frottement.

Considérons (*fig.* 8) un essieu O qui fait avec une

parallèle aux autres essieux un angle $\delta$. Si cet essieu était seul et roulait parfaitement, il s'avancerait normalement à lui-même, et son centre O viendrait en O′, pendant qu'il tournerait d'un angle $d\theta_1$, à cause de la conicité des bandages. Or, l'empattement rigide des autres essieux de la machine oblige le centre de gravité G à se déplacer suivant l'axe GO de la locomotive, dont nous supposons d'abord que la position angulaire ne change pas. Il faut donc que le centre O′ de l'essieu, point assujetti à rester sur l'axe de la machine, se déplace transversalement d'une quantité $O'O_1$, qui est égale au chemin parcouru $V dt$ multiplié par l'angle $\delta$. Il y a donc un premier glissement transversal : $V\delta dt$.

Si, pendant le mouvement, l'angle $\delta$ varie de $d\delta$, le glissement longitudinal dû à l'absence de roulement parfait n'est plus $e d\theta_1$, comme lorsque l'essieu conserve son parallélisme avec les autres, mais $e\,(d\theta_1 - d\delta)$.

Finalement, les composantes du glissement élémentaire, en admettant que l'angle $\theta$ varie à son tour de $d\theta$, ont pour valeur totale :

| | |
|---|---|
| longitudinalement ..... | $e\,(d\theta + d\theta_1 - d\delta)$, |
| transversalement ..... | $l d\theta + V\delta dt$, |

et la tangente de l'angle $\mu'$ que fait la force de frottement avec la direction de l'essieu a pour valeur :

$$\operatorname{tg}\mu' = \frac{e\,(d\theta + d\theta_1 - d\delta)}{l d\theta + V\delta dt}.$$

Le sens de l'angle $\delta$ est déterminé par la direction qu'aurait la force J dans le cas d'un essieu parallèle.

Si l'angle $\theta$ augmente vers la gauche (*fig.* 8), on voit, d'après l'expression de tg $\mu'$, que l'angle $\mu'$ est plus petit que l'angle $\mu$, que nous avons trouvé quand l'essieu reste parallèle ; donc le moment $M_1$ par rapport au centre de gravité augmente généralement avec $\delta$, et le moment



$M'_1$ par rapport au centre de l'essieu diminue quand $\delta$ augmente.

Quelles sont maintenant les variations de ces moments quand $\theta$ varie ?

Partons de la position de la machine $\theta = 0$ sur la droite (*fig.* 9), et supposons qu'au début la vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ ait une valeur notable. La force de frottement J est alors perpendiculaire à GA, et elle donne un moment $M'_1$ par rapport à O, amenant l'essieu dans une position angulaire OA′.

Ensuite le centre O se rapproche de l'axe de la voie, tandis que $\theta$ reste constant ; la force J change de sens et donne un moment tendant à redresser l'essieu.

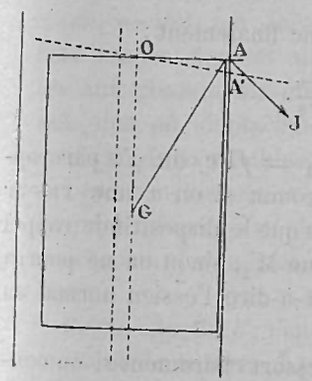



Fig. 9.

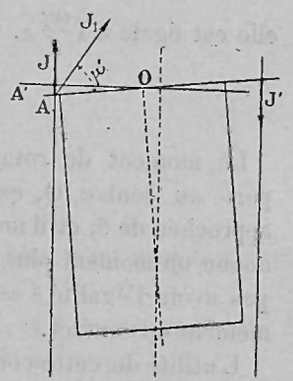



Fig. 10.

Quand O est de l'autre côté de l'axe de la voie, $\theta$ restant toujours constant, la variation $d\theta_1$ a changé de sens et augmente en valeur absolue. Si l'essieu était resté parallèle, j'aurais des forces J, J′, dirigées suivant le rail, qui tendraient à faire tourner l'essieu autour de O de façon à le rendre normal à la voie. Telle est donc la déviation que prend réellement l'essieu. Alors la force de frottement prend la direction $J_1$ (*fig.* 10), et l'angle $\mu'$ est donné

par la relation :

$$\operatorname{tg}\mu' = \frac{ed\theta_1}{V\delta dt}.$$

On peut trouver l'angle $\delta$ si on connaît la résistance qu'oppose au déplacement le dispositif de rappel.

Il y a un grand intérêt à ce que l'essieu soit normal à la voie au moment où le boudin de la roue arrive au contact du rail. Si cela a lieu l'angle $\delta$ est alors égal à $\theta$, et on a :

$$\operatorname{tg}\mu' = \frac{e}{VI\theta} I \frac{d\theta_1}{dt}.$$

Or, la valeur $I\dfrac{d\theta_1}{dt}$ est connue au moment du contact ; elle est égale à $I\dfrac{\omega\gamma}{e}\varepsilon$. On a donc finalement :

$$\operatorname{tg}\mu' = \frac{\omega\gamma\varepsilon}{V\theta}.$$

Le moment de rotation, $M'_1 = fPe \sin \mu'$, par rapport au centre O, est donc connu si on a une valeur approchée de $\theta$, et il ne faut pas que le dispositif de rappel donne un moment plus grand que $M'_1$, sinon on ne pourra pas avoir l'égalité $\delta = \theta$, c'est-à-dire l'essieu normal au moment du contact.

L'utilité de cette condition ressort clairement si on considère un bogie. En effet, lorsque les boudins arrivent au contact des rails, il se produit ordinairement des chocs et des réactions. Si, au moment de ce contact, l'axe du bogie parallèle aux essieux est normal au rail, chocs et réactions se partagent entre les deux roues d'un même côté, puisque leurs boudins arrivent en même temps au contact.

Examinons maintenant quelles sont les forces de frottement dans le cas d'un bogie.

C'est par rapport au pivot qu'il faudra prendre le



moment de ces forces pour connaître la déviation que prennent les essieux du bogie à partir de la position parallèle aux autres essieux de la machine.

Le bogie supposé seul tendrait, comme un essieu seul, à se déplacer normalement, et le pivot C viendrait en C' (*fig.* 11). Mais la liaison invariable du pivot avec la machine ramène ce pivot sur l'axe GC. Il y a donc un glissement transversal $V\delta dt$ et un glissement longitudinal $e\,(d\theta_1 - d\delta)$, qui doivent être respectivement ajoutés aux glissements $ld\theta$ et $ed\theta$ dus au déplacement de l'axe de la machine.

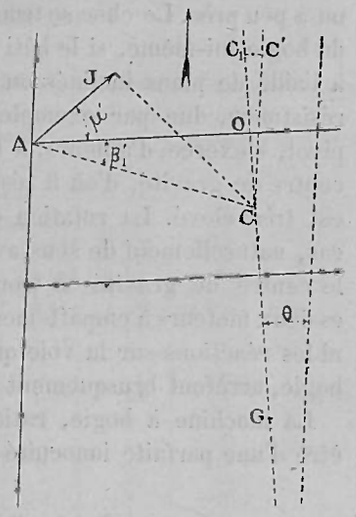


Fig. 11.

Les conclusions relatives aux forces sont donc exactement les mêmes que lorsqu'on a un seul essieu radial.

Si on appelle $\beta'_1$ l'angle OAC, et $d'$ la distance AC, le moment de la force J par rapport à C est :

$$fPd' \sin(\beta'_1 + \mu').$$

En définitive, on peut tirer de ce qui précède les conclusions suivantes, relatives au mouvement de lacet d'une machine à bogie.

La mobilité du bogie permettant de donner aux machines un empattement plus grand, le moment résistant, $\Sigma M$, et le moment d'inertie se trouvent augmentés. Par suite, l'amplitude du lacet doit être plus faible ($\theta$ plus petit)

et quand on arrive au contact des boudins avec les rails, contact produit par la vitesse latérale $V\theta$, elle aussi plus faible, ce qui augmente le pas des oscillations, les deux roues d'un même côté du bogie touchent en même temps, ou à peu près. Le choc se trouve, d'ailleurs, limité à l'arrêt du bogie lui-même, si le bâti peut se déplacer sur le bogie, à l'aide de plans inclinés ou d'appareils quelconques. La résistance, due par exemple à un plan incliné placé au pivot, s'exerce, d'ailleurs, à une distance assez grande du centre de gravité, d'où il résulte que le moment résistant est très élevé. La rotation change, dans la plupart des cas, naturellement de sens avant que le jeu soit épuisé et, le centre de gravité se trouvant toujours en avant des essieux moteurs à empattement rigide, il n'y a ni les chocs, ni les réactions sur la voie qui, dans les locomotives sans bogie, arrêtent brusquement le déplacement latéral.

La machine à bogie, rationnellement construite, doit être d'une parfaite innocuité vis-à-vis de la voie.

(*La fin à la prochaine livraison.*)



# BULLETIN

## STATISTIQUE DU ZINC ET DU PLOMB EN EUROPE POUR L'ANNÉE 1894 (*).

### 1° ZINC.

| PAYS | PRODUCTION du minerai | CONSOMMATION DE MINERAI | | | PRODUCTION du zinc | IMPORTATION du zinc | EXPORTATION du zinc | CONSOMMATION du zinc |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | indigène | étranger | totale | | | | |
| | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. |
| France | 77.000(*a*) | 16.300 | 36.100 | 52.400 | 23.400 | 35.400 | 7.300 | 51.500 |
| Angleterre | 22.200 | 21.800 | 45.600 | 67.400 | 26.500(*b*) | 72.300 | 12.200 | 86.600 |
| Belgique | 11.600 | 10.500 | 221.000 | 231.500 | 97.000 | 9.100 | 81.200 | 24.900 |
| Allemagne | 728.600 | 692.900 | 14.700 | 707.600 | 143.600 | 18.400 | 79.500 | 82.500 |
| Autriche-Hong. | 28.500 | 25.900 | 4.700 | 30.600 | 6.800 | 16.300 | 1.600 | 21.500 |
| Russie | *13.000* | 13.000 | » | *13.000* | 5.000 | 8.300 | 400 | 12.900 |
| Espagne | 58.800 | 13.500 | » | 13.500 | 5.500 | 200 | 2.700 | 3.000 |
| Italie | 131.800 | » | » | » | » | 5.500 | » | 5.500 |
| Grèce | 21.000 | » | » | » | » | 100 | » | 100 |
| Suède | 47.000 | 1.000 | » | 1.000 | 300 | 1.800 | 100 | 2.000 |
| Norvège | » | » | » | » | » | 1.000 | 200 | 800 |
| Hollande | » | » | » | » | » | *3.600* | » | *3.600* |
| Suisse | » | » | » | « | » | 2.500 | 200 | 2.300 |
| Turquie | » | » | » | » | » | *500* | » | *500* |
| Portugal | » | » | » | » | » | 500 | » | 500 |
| Roumanie | » | » | » | » | » | 580 | 20 | 560 |
| Serbie | » | » | » | » | » | 40 | » | 40 |
| Europe | 1.139.500 | ..... | ..... | 1.117.000 | 308.100 | ..... | ..... | 298.800 |

(*a*) Non compris 30.000 tonnes produites en Algérie.
(*b*) Nombre approximatif.

Si l'on ajoutait à la production européenne des minerais de zinc celle de l'Algérie, qui est totalement expédiée en Belgique, il s'en suivrait que 50.000 tonnes environ de ces minerais n'auraient pas été consommées en Europe, du moins dans l'année.

D'autre part, le zinc métallique fabriqué dans l'Europe suffit amplement, comme on le voit, à ses besoins.

Ces deux faits s'accordent pour démontrer que la production du zinc semble arrivée à son maximum.

(*) D'après les statistiques nationales spéciales et les documents des Douanes. Les chiffres en caractères italiques sont présumés.

2° PLOMB.

| PAYS | PRODUCTION du minerai | CONSOMMATION DE MINERAI | | | PRODUCTION du plomb | IMPORTATION du plomb | EXPORTATION du plomb | CONSOMMATION du plomb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | indigène | étranger | totale | | | | |
| | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. | ton. mét. |
| France..... | 25.400 (*a*) | 14.400 | 6.000 | 20.400 | 8.700 | 84.700 | 8.100 | 85.300 |
| Angleterre.. | 41.200 | 41.200 | 15.900 | 57.100 | 42.700 | 164.500 (*b*) | 65.000 | 142.200 |
| Belgique ... | 200 | 400 | 16.100 | 16.500 | 14.100 | 43.500 | 34.700 | 22.900 |
| Allemagne.. | 162.700 | 160.000 | 49.000 | 209.000 | 104.400 | 25.800 | 35.200 | 95.000 |
| Autriche ... | 12.000 | 10.500 | 2.400 | 12.900 | 9.600 | | | |
| Hongrie.... | *10.000* | 4.000 | » | *4.000* | 2.300 | 9.000 | 1.400 | 19.500 |
| Russie..... | *2.000* | 2.000 | » | *2.000* | 900 | 28.300 | 300 | 28.900 |
| Espagne.... | 322.600 | 302.700 | » | 302.700 | 152.600 | » | 159.000 (*c*) | *6.000* |
| Italie..... | 29.800 | 23.400 | 13.400 | 36.800 | 19.600 | 1.500 | 1.200 | 19.900 |
| Grèce..... | 6.000 (*d*) | 6.000 | » | 6.000 | 16.000 | » | 8.000 (*e*) | 8.000 |
| Suède ..... | 14.800 | 700 | » | 700 | 300 | 1.800 | 800 | 1.300 |
| Norvège.... | » | » | » | » | » | 700 | 200 | 500 |
| Hollande ... | » | » | » | » | » | 7.400 | 2.700 | 4.700 |
| Suisse ..... | » | » | » | » | » | 2.900 | 200 | 2.700 |
| Turquie..... | » | » | » | » | » | 4.200 | » | 4.200 |
| Portugal ... | » | » | » | » | » | *200* | » | *200* |
| Roumanie .. | » | » | » | » | » | 170 | » | 170 |
| Serbie ..... | » | » | » | » | » | 30 | » | 30 |
| Europe..... | 626.700 | ..... | ..... | 668.100 | 371.200 | ..... | ..... | 441.500 |

(*a*) Non compris 3.600 tonnes de minerai de fer plombeux.
(*b*) 66.000 tonnes sont importées en Angleterre d'Australie et d'Amérique.
(*c*) Une douzaine de mille tonnes de cette exportation ont été prises vraisemblablement sur la production antérieure.
(*d*) Il a été extrait en outre 70.000 tonnes de minerai de fer plombeux.
(*e*) Exportation en Angleterre, d'après la douane de ce pays.

L'Europe a importé 40.000 tonnes de minerai de plomb et 70.000 tonnes de plomb (voir pour cette dernière quantité la note *b* ci-dessus).



# THÉORIE
DE LA
# STABILITÉ DES LOCOMOTIVES
(SECONDE PARTIE) (*)

MOUVEMENT DE LACET
Par M. J. NADAL, Ingénieur des Mines
(*Suite et fin*) (*).

## CHAPITRE II (*suite*).

### XII. — **Circulation en courbe.**

Quand un véhicule se déplace sur une courbe, le boudin de la roue d'avant extérieure a tendance à rester en contact avec le rail. Ce contact persiste-t-il, dans une locomotive, quoiqu'il y ait des forces tendant à lui imprimer un mouvement de rotation sur elle-même ? Cela dépend de la valeur relative du moment produisant la rotation et du moment résistant. Il y a donc lieu de rechercher tout d'abord quelles sont les forces de frottement qui sont développées entre les roues et les rails dans le mouvement d'une machine, ou plus généralement d'un véhicule quelconque, en courbe.

Considérons un essieu seul, se déplaçant sur une courbe de rayon R. Traçons trois cercles concentriques, $O_1$, O et $O_2$, avec les rayons $R + \varepsilon$, R et $R - \varepsilon$, $\varepsilon$ étant le demi-

(*) Voir tome IX, 4e livr. 1896, p. 413-467, et tome X, 8e livr. 1896, p. 232-288.

jeu de la voie, et supposons que le centre C de l'essieu se trouve placé entre les circonférences $O_1$ et O, à une distance $\varepsilon'$ de la circonférence O. La roue extérieure roule sur un rayon $r_e$ égal au rayon moyen, $r$, augmenté du produit de $\varepsilon'$ par la conicité $\gamma$ : ainsi $r_e = r + \varepsilon'\gamma$. De même, la roue intérieure roule sur un rayon $r_i = r - \varepsilon'\gamma$. Si $\omega$ est la vitesse angulaire, supposée uniforme, de l'essieu, le chemin élémentaire parcouru par la roue extérieure, s'il n'y a pas de glissement, est :

$$\omega\,(r + \varepsilon'\gamma)\,dt\,;$$

et le chemin parcouru dans les mêmes conditions par la roue intérieure est :

$$\omega\,(r - \varepsilon'\gamma)\,dt.$$

Ainsi la position angulaire de l'essieu varie d'un angle :

$$d\beta = \frac{\omega\varepsilon'\gamma}{e}\,dt.$$

Or, soit $\alpha$ l'angle de l'essieu avec le rayon de la courbe passant par le centre de l'essieu. Ce centre est animé

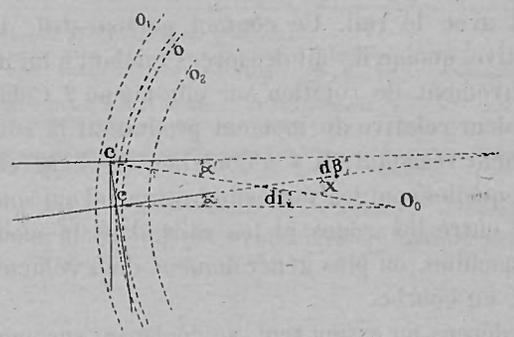



Fig. 12.

d'un mouvement de translation, normal à l'essieu, avec une vitesse V, de sorte que, dans l'instant $dt$, le point C (*fig.* 12) est venu en C', ayant parcouru un chemin $V dt$.



L'angle au centre $CO_0C' = di$ a pour valeur :

$$di = \frac{V dt}{R}.$$

Connaissant $\alpha$, $d\beta$, $di$, nous allons chercher $\alpha'$, angle que fait avec le rayon $C'O_0$ l'essieu dans sa nouvelle position.

Il est visible, sur la *fig.* 12, qu'on a :

$$\text{angle } x = \alpha + di = \alpha' + d\beta,$$

d'où :

$$\alpha' = \alpha + di - d\beta.$$

Il en résulte que, si $di > d\beta$ ou $\frac{V dt}{R} > \frac{\omega\varepsilon'\gamma}{e}\,dt$, l'angle $\alpha'$ est plus grand que $\alpha$, et l'essieu prend une position de plus en plus oblique. Cette obliquité est limitée par le jeu de la voie dans un véhicule à plusieurs essieux, et il arrive par suite un moment où l'angle $\alpha$ doit rester constant. L'écart angulaire $di - d\beta$ doit alors être rattrapé par un glissement des roues.

Il est à remarquer que chacune des roues d'un essieu peut glisser d'une quantité différente, surtout si la pression sur les rails n'est pas la même. Ces glissements et les forces de frottement qui en résultent sont tels que l'essieu doit se trouver en équilibre, en tenant compte de toutes les forces appliquées (*). Mais on peut admettre ordinairement que les glissements sont les mêmes pour chaque roue, égaux à :

$$e\,(di - d\beta) = e\left(\frac{V}{R} - \frac{\omega\varepsilon'\gamma}{e}\right)dt,$$

et que les forces de frottement sont alternes par rapport à la direction de l'essieu.

(*) Voir : *Théorie du mouvement en courbe*, par M. Léon Pochet, librairie Dunod ; — et *Revue générale des chemins de fer*, février 1883.

La condition $di = d\beta$ donne la courbe limite pour laquelle un essieu, profitant de tout le jeu de la voie, peut rouler parfaitement. En posant : $\varepsilon = 0^m,015$, $\gamma = \frac{1}{15}$, $e = 0,75$, $r = 0^m,60$, on trouve :

$$R = 450 \text{ mètres.}$$

Nous allons maintenant étudier les forces de frottement dans le cas de plusieurs essieux solidaires et parallèles, quand l'axe de la machine ou du véhicule conserve une même position sur la courbe, c'est-à-dire quand les centres des essieux restent sur les mêmes circonférences concentriques.

Supposons qu'il s'agisse d'un véhicule à quatre essieux et considérons l'essieu d'avant, dont le centre se trouve à la distance $\varepsilon_1$ de la circonférence moyenne O et qui fait l'angle $\alpha_1$ avec le rayon passant par son centre.

Comme on l'a vu plus haut, la roue extérieure glisse longitudinalement vers l'avant d'une quantité sensiblement égale à :

$$(1) \qquad e\,(di - d\beta) = \omega dt\left(\frac{er}{R} - \varepsilon_1\gamma\right).$$

En outre, la translation du véhicule qui s'effectue avec une vitesse V, sensiblement égale à $\omega r$, a pour effet de déplacer le centre de l'essieu sur l'axe du véhicule CG et de faire venir le point C en C′ (*fig.* 13). Mais, comme nous avons supposé au début que le centre de chaque essieu reste sur la même circonférence, il faut que le point C′ vienne en $C_1$ et qu'il y ait, par suite, un glissement vers l'intérieur de la voie égal à :

$$(2) \qquad V\alpha dt = \omega r\alpha dt.$$

L'expression (1) donne le glissement longitudinal, et l'expression (2), le glissement transversal. La résultante



de ces deux glissements et, par suite, la force de frottement qui lui est directement opposée, font avec la direction de l'essieu un angle $\mu_1$, dont la tangente est :

$$\operatorname{tg}\mu_1 = \frac{\frac{er}{R} - \varepsilon_1\gamma}{r\alpha_1}.$$

Pour la roue intérieure, la force de frottement a une direction alterne.

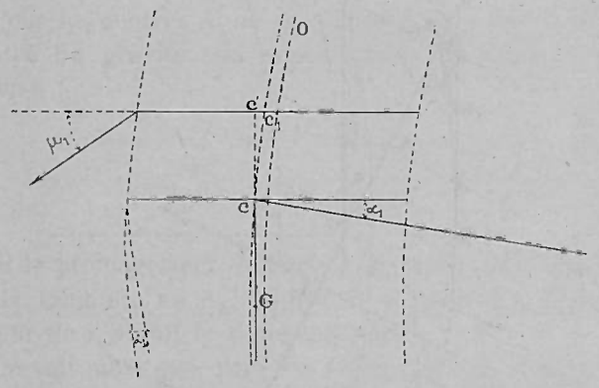



Fig. 13.

Il n'y a qu'à remplacer $\varepsilon_1$ et $\alpha_1$ par les valeurs correspondant aux autres essieux, auxquelles il faut donner les signes convenables, pour avoir les directions des forces de frottement des autres roues.

Nous allons maintenant exprimer les inconnues $\varepsilon$ et $\alpha$ en fonction de deux variables seulement. Si je me donne la distance $\zeta$ du centre de gravité du véhicule à l'axe de la voie, c'est-à-dire à la circonférence moyenne O, et l'angle $\frac{\pi}{2} + \theta$ que fait l'axe du véhicule avec le rayon de la courbe passant par le centre de gravité G, la position du véhicule sur la voie est évidemment déterminée. Par

conséquent, tous nos éléments inconnus sont fonction de $\zeta$ et de $\theta$.

Soient (*fig.* 14) : OO, l'axe de la voie ; $A_1$, $A_2$, $A_3$, $A_4$, les centres des essieux ; G, le centre de gravité qui se trouve à la distance $\zeta$ de OO. L'axe $A_1GA_4$ fait avec le rayon $GO_0$ l'angle $\frac{\pi}{2} + \theta$.

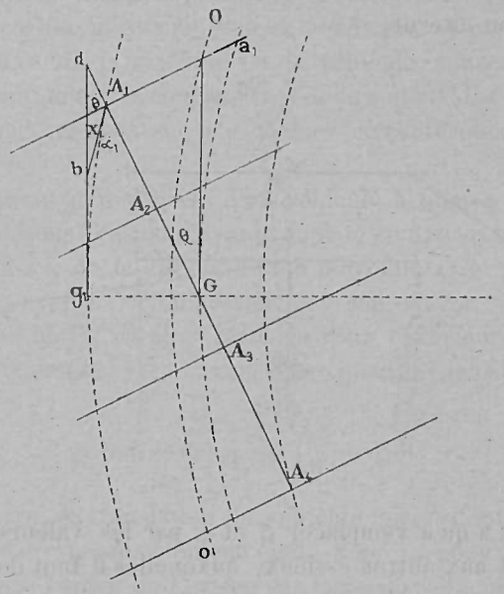



FIG. 14.

Cherchons d'abord la valeur de $\alpha_1$. En considérant le petit triangle $A_1bd$, on a :

$$\alpha_1 = \theta + x.$$

Or, l'angle $x$ n'est autre que l'angle de contingence de l'arc $g_1A_1$, très petit par rapport au rayon de la courbe ; il est donc égal au quotient de cet arc par le rayon de courbure R. L'arc $g_1A_1$ est égal, à un infiniment petit du



second ordre près, à la distance $l_1$ de $A_1$ au centre de gravité ; donc :

$$x = \frac{l_1}{R};$$

et :

$$\alpha_1 = \theta + \frac{l_1}{R}$$

On a de même :

$$\alpha_2 = \theta + \frac{l_2}{R}.$$

Pour les centres $A_3$ et $A_4$ qui sont de l'autre côté du centre de gravité, un raisonnement identique montre qu'on a :

$$\alpha_3 = \theta - \frac{l_3}{R};$$

$$\alpha_4 = \theta - \frac{l_4}{R}.$$

Si le prolongement de l'axe $A_1A_4$ se trouvait à gauche de la tangente en $A_4$, au lieu de se trouver à droite, la valeur de $\alpha_4$ aurait le signe contraire.

On voit ainsi que, pour les essieux qui se trouvent en arrière du centre de gravité, l'angle de la roue avec le rail va en diminuant ; les essieux se rapprochent donc de la position radiale.

Cherchons maintenant les valeurs des $\varepsilon$ en fonction de $\theta$ et de $\zeta$. Dans le triangle curviligne formé par les droites $GA_1$, $A_1a_1$ et par l'arc de cercle $Ga_1$, où l'angle en G est très petit, on voit que le côté $A_1a_1$, c'est-à-dire $\varepsilon_1 + \zeta$, est égal, à une quantité du second ordre près, à $l_1\theta$ plus la distance $\delta$ du point $a_1$ de la circonférence à la tangente en G. On a donc :

$$\varepsilon_1 + \zeta = l_1\theta + \delta.$$

Or :

$$\delta = \frac{l_1^2}{2R}$$

donc :

$$\varepsilon_4 = l_4\theta - \xi + \frac{l_4^2}{2R}$$

On a une expression analogue pour $\varepsilon_2$, et, pour $\varepsilon_4$, il vient :

$$\varepsilon_4 = l_4\theta + \xi - \frac{l_4^2}{2R}.$$

L'expression générale est :

$$\varepsilon = l\theta \mp \left(\xi - \frac{l^2}{2R}\right).$$

Nous sommes donc en mesure d'exprimer les angles $\mu$ que font les forces de frottement avec les directions des essieux, en fonction des deux seules variables $\theta$ et $\zeta$.

L'angle $\theta$ resterait invariable, si le mouvement de la locomotive en courbe était uniforme. Mais il n'en est pas ainsi ordinairement à cause du moment des forces de la vapeur qui sollicite une locomotive à tourner sur elle-même. En thèse générale, $\theta$ doit donc varier.

Supposons qu'il y ait une déviation $d\theta$ vers l'intérieur de la voie. Aux glissements élémentaires précédemment calculés, pour l'essieu d'avant par exemple, il faudra ajouter un glissement longitudinal $ed\theta$ et un glissement transversal $ld\theta$.

Les composantes du glissement élémentaire sont donc au total :

transversalement... $\quad V\alpha_4 dt + ld\theta = V\theta dt + \frac{Vl_4}{R}dt + l_4 d\theta;$

longitudinalement.. $\quad \omega dt\left(\frac{er}{R} - \varepsilon_4\gamma\right) + ed\theta;$

et la tangente de l'angle $\mu$ que fait la force de frottement avec le rail est :

$$\operatorname{tg}\mu_4 = \frac{\omega dt\left(\frac{er}{R} - \varepsilon_4\gamma\right) + ed\theta}{V\theta dt + \frac{Vl_4}{R}dt + l_4 d\theta} = \frac{e\left(\omega\frac{r}{R}dt + d\theta\right) - \omega\gamma\varepsilon dt}{l_4\left(\omega\frac{r}{R}dt + d\theta\right) + V\theta dt}.$$



Si je considère (*fig.* 15) la perpendiculaire AF à AG, l'angle $\mu_0$ qu'elle fait avec l'essieu a pour tangente :

$$\operatorname{tg}\mu_0 = \frac{e}{l}.$$

L'angle $\mu_4$ est plus petit que $\mu_0$, et cela est vrai pour les essieux d'avant dont le centre est vers l'extérieur de l'axe de la voie. Donc la force $J_4$ est comprise dans l'angle $\widehat{FAE}$, et son moment est compris entre $fPd$ et $fPl$.

Quand le rayon de la courbe est très grand, le dernier terme du numérateur de tg $\mu_4$ peut se trouver plus grand que le premier terme, entre parenthèses, et la valeur de tg $\mu_4$ est alors négative. La force de frottement se trouve alors comprise dans l'angle EAL et finit par donner un moment de rotation favorable lorsqu'elle passe de l'autre côté du prolongement de GA vers AL.

En résumé, la direction des forces de frottement est facile à déterminer pour tous les essieux, et nous ne croyons pas nécessaire d'insister plus longuement à ce sujet.

## XIII. — **Mouvement de lacet en courbe.**

En courbe, comme en alignement, une locomotive est animée d'un mouvement de translation suivant son axe longitudinal, avec une vitesse V, et d'un mouvement de rotation autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité.

Supposons d'abord que la machine soit libre sur la voie et soit A $a_2 a_3 a_4$, son empattement rigide (*fig.* 15); chacun des quatre points A, $a_2$, $a_3$, $a_4$ correspond au rayon vertical passant par le boudin de chaque roue et se trouve à une certaine distance du rail.

Si la rotation de la machine s'effectue vers la gauche, le boudin de la roue extérieure d'avant se trouve porté rapidement contre le rail, tant par suite de la rotation que par suite de la translation.

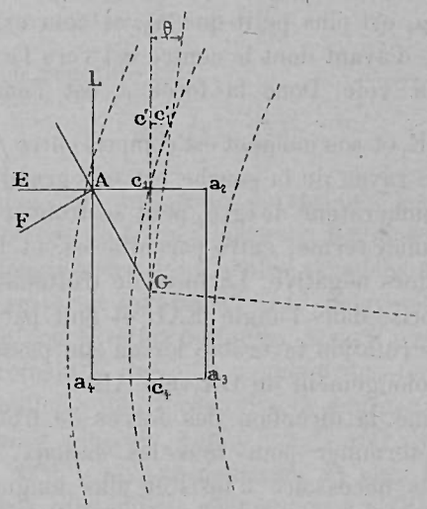



FIG. 15.

Si la rotation s'effectue vers la droite avec une vitesse $\frac{d\theta}{dt}$, le centre $C_1$ de l'essieu d'avant parcourt dans l'instant $dt$ vers la droite un chemin $l_1 \frac{d\theta}{dt} dt$. Dans le même temps, il se déplace dans la direction de l'axe longitudinal d'une quantité $V dt$. S'il n'y avait pas rotation, le point G serait venu en C', et, pour avoir sa position réelle, en tenant compte de la rotation, il suffit de porter normalement à C'G$_1$, à partir de C', la longueur $l_1 d\theta$. On obtient ainsi un point $C'_1$ qui se trouve à droite ou à gauche de la circonférence de rayon $R + \varepsilon_1$ passant par $C_1$.

S'il se trouve à gauche, le centre de l'essieu s'éloigne



de l'axe de la voie, et le boudin de la roue extérieure $a_1$ tend à venir en contact avec le rail. S'il se trouve à droite, c'est le contraire qui arrive.

L'angle de la roue $a_1$ avec le rail, ou de l'essieu avec le rayon de la courbe passant par son centre, étant $\alpha_1$, la distance du point C' à la circonférence passant par $C_1$ est $V\alpha_1 dt$. Donc le point $C'_1$ se trouvera à droite ou à gauche de la circonférence $C_1$, suivant qu'on aura :

$$V\alpha_1 dt < \text{ou} > l_1 \frac{d\theta}{dt} dt.$$

Ainsi, la condition pour que le boudin de la roue extérieure d'avant ne vienne pas en contact avec le rail, ou pour que, étant en contact, celui-ci cesse, est :

$$V\alpha_1 < l_1 \frac{d\theta}{dt},$$

qu'on peut écrire, en remplaçant $\alpha_1$ par sa valeur en fonction de $\theta$ :

$$\text{(A)} \qquad V\left(\theta + \frac{l_1}{R}\right) < l_1 \frac{d\theta}{dt}.$$

Nous supposerons maintenant que le boudin de la roue extérieure d'avant est en contact avec le rail, et nous allons chercher dans quels cas la condition ci-dessus pourra être réalisée.

Du moment qu'il y a contact, le centre de l'essieu d'avant reste à une distance fixe de l'axe de la voie et est animé d'un mouvement circulaire uniforme. En même temps, la locomotive peut prendre un mouvement de rotation autour de ce centre de l'essieu d'avant. Soient $I_1$ le moment d'inertie de la machine ; N, le moment des forces agissant sur les longerons, $M_1$ le moment des forces de frottement par rapport à l'axe vertical passant par $C_1$. Comme on peut négliger la force d'inertie d'entraînement, l'équation du

mouvement de rotation sera simplement :

$$I_1 \frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M_1.$$

Il faut déterminer le sens du moment $M_1$.

On a vu dans le paragraphe précédent que, pour une valeur donnée, constante, de $\theta$, l'angle que fait avec l'essieu la force de frottement d'une roue sur le rail est donnée par :

$$\operatorname{tg} \mu_n = \frac{\frac{er}{R} - \varepsilon_n \gamma}{r\alpha_n} = \frac{\frac{er}{R} - \varepsilon_n \gamma}{r\left(\theta \pm \frac{l_n}{R}\right)},$$

la quantité $\varepsilon_n$ étant positive si le centre de l'essieu se trouve à l'extérieur de l'axe de la voie, et négative dans le cas contraire ; en outre, le dénominateur prend le signe + ou le signe — devant $\frac{l_n}{R}$, suivant que l'essieu se trouve placé en avant ou en arrière du centre de gravité.

Dans une locomotive à quatre essieux les forces de frottement des deux essieux d'avant sont telles que $J_1$, $J'_1$, $J'_2$, $J'_2$ (*fig.* 16).

Pour les essieux d'arrière, il y a deux directions possibles, suivant que $\theta$ est plus grand ou plus petit que $\frac{l_n}{R}$.

L'angle $\theta$ est d'autant plus petit que la roue extérieure d'arrière est plus rapprochée du rail. Dans ce cas, on peut avoir, si R n'est pas trop grand,

$$\theta < \frac{l_n}{R},$$

et les forces d'arrière sont telles que $J_3$, $J'_3$, $J_4$, $J'_4$.

D'ailleurs :

$$\operatorname{tg} \mu_4 = \frac{e\frac{r}{R} - \varepsilon_4 \gamma}{-l_4 \frac{r}{R} + r\theta};$$



les quantités $\varepsilon_4 \gamma$ et $r\theta$ sont très petites comparativement à $e\frac{r}{R}$ et $l_4 \frac{r}{R}$, d'où il résulte qu'on peut poser approximativement :

$$\operatorname{tg} \mu_4 = \frac{e}{l_4},$$

et que la force $J_4$ est sensiblement perpendiculaire à la ligne joignant le point de contact de la roue au centre de gravité. Soit $d_4$ la distance de ces deux points. Le moment de $J_4$ par rapport au centre de gravité est : $f P_4 d_4$.

Si on prend le moment de toutes les forces par rapport au centre de l'essieu d'avant, on voit que les forces de frottement des premier, troisième et quatrième essieux tendent à faire tourner de droite à gauche ; celles du deuxième essieu donnent un moment contraire, mais assez faible. Le moment total, $M_1$, tend donc à faire tourner de droite à gauche, c'est-à-dire est positif. Si le moment N est négatif et plus grand que $M_1$ en valeur absolue, il pourra y avoir rotation de gauche à droite, et l'angle $\theta$ diminuera. Mais, le plus ordinairement, c'est le contraire qui a lieu, car $M_1$ est presque toujours plus grand que N, si $\theta$ est petit. Alors il y a rotation de droite à gauche, et $\theta$ augmente.

Quand $\theta = \frac{l_4}{R}$ ou $\frac{l_3}{R}$, c'est-à-dire quand l'un des essieux d'arrière est radial, la force J est dirigée suivant la tangente au rail. Donc, à mesure que $\theta$ augmente, le moment des forces de frottement des essieux d'arrière diminue.

Quand $\theta > \frac{l_4}{R}$, les forces de frottement d'arrière sont $I_3$, $I'_3$, $I_4$, $I'_4$ (*fig.* 16), et il arrive un instant où leur moment par rapport au centre du premier essieu change de sens.

L'analyse ci-dessus explique clairement pourquoi un

véhicule tend à prendre en courbe une position oblique, telle que le boudin de la roue extérieure d'avant est en contact avec le rail et que l'essieu d'arrière arrive à la position radiale et doit même la dépasser d'une certaine quantité, de façon que les forces de frottement arrivent à se faire équilibre. Dans les courbes raides, l'essieu d'arrière ne peut arriver à la position radiale ; le boudin de la roue intérieure du dernier ou de l'avant-dernier essieu entre en contact avec le rail.

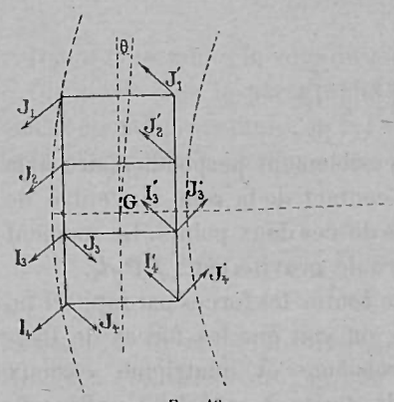


Fig. 16.

Pour que le mouvement de rotation d'une locomotive soit possible, il faut que, dans la position où les forces de frottement donnent un moment résistant, $M_1$, minimum, ce moment soit plus petit que le moment moteur N.

D'après ce que nous avons dit plus haut, le minimum du moment $M_1$ correspond à l'obliquité maxima de la machine. Pour avoir cette obliquité maxima, il suffit, après avoir tracé les deux circonférences de rayons $R + \varepsilon$ et $R - \varepsilon$ et avoir placé le centre de l'essieu d'avant sur la circonférence $R + \varepsilon$, de faire tourner l'axe de la machine jusqu'à ce que le centre d'un des essieux d'arrière se trouve sur la circonférence $R - \varepsilon$.

Cela équivaut, du reste, à une identification algébrique. Nous avons, dans le paragraphe précédent, exprimé $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$, $\varepsilon_4$, en fonction de $\theta$ et de $\zeta$. Si le boudin de la roue extérieure d'avant est en contact avec le rail, on a $\varepsilon_1 = \varepsilon$, demi-jeu de la voie. S'il en est de même pour la roue intérieure d'arrière, on a également : $\varepsilon_4 = \varepsilon$. Dès lors, les



deux équations :

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= l_1\theta - \zeta + \frac{l^2_1}{2R} \\ \varepsilon &= l_4\theta + \zeta - \frac{l^2_4}{2R} \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

permettent de trouver les deux inconnues $\theta$ et $\zeta$. Ces valeurs de $\theta$ et $\zeta$, étant substituées dans l'équation qui donne $\varepsilon_3$ :

$$\varepsilon_3 = l_3\theta + \zeta - \frac{l^2_3}{2R},$$

doivent donner pour $\varepsilon_3$ une quantité plus petite que $\varepsilon$ ; sinon, c'est le boudin de la roue intérieure du troisième essieu qui vient en contact avec le rail, et, dans le système des deux équations (1), il faut remplacer la deuxième par $\varepsilon = \varepsilon_3$.

La condition pour que ce soit le boudin de la roue du dernier essieu qui entre en contact est :

$$R > \frac{(l_1 + l_3)(l_1 + l_4)}{4\varepsilon}.$$

Quoi qu'il en soit, on est en mesure de calculer, pour l'obliquité maxima, la valeur de tg $\mu$ en fonction du rayon de la courbe et de l'empattement, et de calculer aussi le moment $M_1$. Il a, d'ailleurs, une expression algébrique trop compliquée pour qu'on puisse en tirer des conclusions générales.

Le moment $M_1$ peut être résistant, c'est-à-dire tendre à appliquer les boudins des roues contre les rails extérieur et intérieur, ou bien il peut tendre à redresser l'axe de la machine. Dans le premier cas le mouvement de rotation n'aura lieu que si le moment N acquiert des valeurs plus grandes que $M_1$ ; dans le second cas, il aura toujours lieu.

Trois cas peuvent, en définitive, se présenter suivant la grandeur du rayon de la courbe :

1° Dans les courbes de petit rayon, il n'y a pas de mou-

vement de rotation de l'axe de la locomotive, lequel prend et conserve sur la courbe l'obliquité maxima ;

2° Dans les courbes de rayon moyen, l'axe de la locomotive prend un mouvement de rotation autour du centre de l'essieu d'avant ; mais le boudin de la roue extérieure d'avant ne cesse pas de rester en contact avec le rail et la condition (A) n'est jamais satisfaite ;

3° Dans les courbes de grand rayon, la condition (A) est, à certains moments, satisfaite, et le mouvement de lacet s'effectue comme en alignement.

Il y a donc trois genres de courbes ; il n'est, d'ailleurs, pas possible de déterminer *a priori* les rayons limites, qui dépendent d'éléments variables, le moment N et le type de machine.

Dans les courbes du premier genre (petits rayons), il n'y a pas de chocs, mais seulement des réactions statiques des mentonnets sur les rails.

Dans les courbes du second genre, il y a des chocs sur le rail intérieur, mais de très peu d'importance.

Enfin, dans les courbes du troisième genre, il y a des chocs sur les rails extérieurs analogues à ceux qui se produisent en alignement.

Au point de vue des chocs, l'action nuisible des machines sur la voie doit donc être moins grande en courbe qu'en alignement.

Cependant, si, pour une cause accidentelle, le contact du boudin de la roue extérieure d'avant vient à cesser dans une courbe de petit ou de moyen rayon, quand ce contact se rétablira, il y aura un choc d'autant plus violent que l'obliquité possible de la machine est plus grande.

*Réactions des mentonnets sur les rails.* — Elles se calculent exactement comme au § IX ; mais il faut, en outre, tenir compte de la force centrifuge $\frac{PV^2}{gR}$ et de la



composante de la pesanteur sur le plan des rails due au dévers $\delta$. Nous pouvons négliger la composante de la pesanteur due à la différence de charge des deux roues d'un même essieu et à la conicité (Voir le dernier alinéa du § V).

On a donc pour la réaction X, quand une machine est seule :

$$X = F - \frac{\Pi}{g} l \frac{d^2\theta}{dt^2} + P\left(\frac{V^2}{gR} - \delta\right).$$

Le terme $P\left(\frac{V^2}{gR} - \delta\right)$ est ordinairement négligeable.

Si l'accélération angulaire $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ est nulle par suite du contact avec le rail du mentonnet de la roue d'arrière (dans les courbes de petit rayon), il faut introduire dans l'équation ci-dessus la réaction X′ qui provient de ce contact.

En définitive, dans le cas d'une machine seule, le maximum de X est voisin de $f\Pi$, produit du poids de la machine par le coefficient du frottement, et est, par conséquent, du même ordre de grandeur qu'en alignement. Seulement, tandis qu'en alignement la réaction X n'agit sur le rail que d'une façon intermittente et chaque fois pendant un temps très petit, en courbe cette réaction agit constamment.

*Jeux des essieux.* — Si nous supposons que les essieux d'avant et d'arrière d'une machine soient munis de plans inclinés, l'obliquité maxima que peut prendre la machine est plus grande que si l'empattement rigide est total, et, par suite, la locomotive peut circuler dans des courbes plus raides. Il peut, en outre, y avoir mouvement de rotation sur toutes les courbes où le jeu des plans inclinés ne s'épuise pas complètement. Ce mouvement de rotation doit, d'ailleurs, être de peu d'amplitude, étant donnée la

grande résistance que lui opposent les plans inclinés. En courbe comme en alignement, la réaction du plan incliné vient en déduction de la réaction X exercée sur le rail par le premier essieu de l'empattement rigide.

## XIV. — Action du tender et du train sur le mouvement de la locomotive.

Le tender exerce sur le mouvement de lacet de la locomotive une influence plus ou moins grande, suivant le système d'attelage. Ordinairement, l'attelage se compose d'un tendeur principal à vis, de deux autres tendeurs ou de deux chaînes de sûreté et de deux tampons analogues à ceux des wagons, c'est-à-dire entrant en contact avec les tampons opposés par des surfaces planes ou plutôt légèrement sphériques normales à l'axe des véhicules, Quelquefois la surface de contact des tampons, ou, si l'on veut, le plan tangent aux surfaces et passant au point de contact est incliné sur l'axe de la locomotive. Sur les machines d'express de la Compagnie d'Orléans, la normale à ce plan tangent passe à peu près par le centre de gravité de la locomotive.

Enfin, il existe des attelages spéciaux, que nous étudierons plus loin, dans lesquels les axes de la locomotive et du tender, quelle que soit leur position angulaire, se coupent toujours en un même point.

La locomotive et le tender réagissent l'un sur l'autre: 1° par la barre d'attelage ; 2° par les tampons.

L'influence de la barre d'attelage (tendeur à vis avec ressort de traction) ne se fait sentir que lorsque la locomotive tire le train, c'est-à-dire marche sous vapeur. Soient: GA, l'axe de la machine ; G'A', celui du tender; AA', la barre de traction (*fig.* 16 *bis*). Le tender exerce sur la machine au point A' un effort résistant T, parallèle à



l'axe de la voie (ou en tout cas ne faisant avec lui qu'un angle très petit), lequel fait équilibre aux réactions des rails sur les roues motrices dans le cas de mouvement uniforme. L'effort exercé dans la direction de AA' est égal à $\frac{T}{\cos i}$ et donne un moment par rapport au centre de gravité de la machine égal à $\frac{T}{\cos i} \times \overline{Gg}$. Ce moment tend, comme on le voit, à redresser l'axe de la locomotive et s'oppose, par suite, au mouvement de lacet. Il pourrait lui être favorable si le tender occupait la position A″G″.

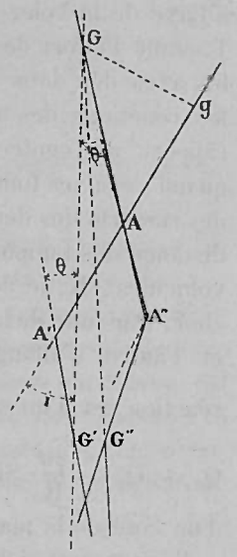


Fig. 16 *bis*.

La valeur du moment dépend de l'angle des deux véhicules, qui est toujours très petit, et de la longueur de la barre d'attelage. Cette longueur varie ordinairement de 0$^{m}$,60 à 0$^{m}$,80. Même dans le cas de la déviation maxima des véhicules, on trouve que le moment de l'effort de traction est très faible et, par suite, négligeable.

L'action des tampons est bien plus considérable, mais elle exige que les tampons soient fortement serrés les uns contre les autres, ce qui peut ne pas toujours avoir lieu. Les ressorts des tampons ont ordinairement une bande initiale. Si ceux-ci sont simplement amenés au contact, ils n'exerçent l'un sur l'autre aucune réaction. Mais, s'ils sont serrés de façon à diminuer d'une certaine quantité la flèche du ressort de choc, la réaction est égale à la bande initiale augmentée de la tension due à la diminution de la flèche. Le serrage, pour être efficace, doit être tel que la tension totale soit toujours supérieure

à l'effort de traction. Soient : $Q_0$, la bande initiale du ressort de choc d'un tampon ; $Q_1$, la tension donnée par le serrage. La réaction du tender sur la machine, en admettant que la normale au point de contact des tampons soit parallèle à l'axe de la voie, sera : $2(Q_0 + Q_1)$. On devra avoir, T étant l'effort de traction : $2(Q_0 + Q_1) > T$. Lorsque les axes des deux véhicules sont dans le prolongement, les réactions des tampons donnent un moment nul par rapport au centre de gravité de la machine. Mais, quand ces axes font entre eux un certain angle, la tension des ressorts des deux tampons est différente. Soient : $u$, la distance des tampons au plan médian; $\varphi$, l'angle des deux véhicules ; K, le coefficient de flexibilité des ressorts de choc. Par suite de la déviation $\varphi$, l'un des tampons s'écrase, et l'autre s'allonge de la quantité $\varphi u$. Par suite, la réaction est d'un côté : $Q_0 + Q_1 + \frac{\varphi u}{K}$; et, de l'autre côté : $Q_0 + Q_1 - \frac{\varphi u}{K}$. Si on a : $\frac{\varphi u}{K} > Q_1$, la réaction des tampons d'un côté de la machine disparaît, mais cela n'a pas lieu ordinairement, si le serrage est suffisant et, si K a une valeur assez grande.

Le moment de ces forces par rapport à l'axe vertical passant par le centre de gravité de la machine est :

$$u\left(Q_0 + Q_1 + \frac{\varphi u}{K}\right) - u\left(Q_0 + Q_1 - \frac{\varphi u}{K}\right) = \frac{2\varphi u^2}{K}.$$

Pour le tender, le moment est de signe contraire.

Ce moment tend à diminuer l'angle des deux véhicules et, par suite, à combattre le mouvement de lacet. En alignement, il exerce une influence bienfaisante, mais il n'a qu'une faible valeur, car l'angle $\varphi$ est toujours petit, et le coefficient de flexibilité K des ressorts de choc est relativement grand, de 15 à 20 millimètres par tonne ordinairement.



En courbe, il en est autrement. Les véhicules, en s'inscrivant sur la courbe, font toujours entre eux un angle tel que le moment $\frac{2\varphi u^2}{K}$ agit sur la locomotive de façon à la faire tourner, à l'avant, de l'intérieur vers l'extérieur de la courbe et à augmenter ainsi la réaction du boudin de la roue extérieure d'avant contre le rail. Cette réaction se trouve, d'ailleurs, sensiblement augmentée, parce que le moment $\frac{2\varphi u^2}{K}$ peut acquérir en courbe des valeurs notables.

Ainsi, la réaction des tampons contrarie toujours le mouvement de lacet, mais en courbe cela est nuisible.

L'effet que nous signalons peut se trouver considérablement aggravé à la descente des pentes, lorsque le train pousse la locomotive, dont la résistance par tonne est toujours beaucoup plus grande que celle des wagons. Si la poussée du train est supérieure au serrage, $2Q_1$, celui-ci augmente d'une certaine quantité, et la variation de tension $\frac{\varphi u}{K}$ se trouve augmentée.

L'effet des réactions des tampons peut être encore plus nuisible dans le cas où il y a deux machines en tête d'un train, et où ces deux machines agissent d'une façon contradictoire (par exemple, la première retenant le train soit par son frein, soit par la contre-vapeur, tandis que la seconde exerce un effort de traction ou simplement n'a pas serré son frein). Il y a lieu de signaler, en outre, un autre inconvénient de la double traction, qui se rapporte aux oscillations du poids suspendu. Lorsque l'avant de la deuxième machine se trouve soulevé d'une quantité $z$, en produisant une décharge des roues d'avant, il peut se faire qu'il reste soulevé pendant un temps notable, c'est-à-dire que l'oscillation normale soit contrariée et même suspendue au moment le plus défavorable, par

suite de la résistance qu'éprouvent à se déplacer verticalement, de haut en bas, les tampons d'avant fortement pressés sur les tampons du tender de la première locomotive. Le déraillement des roues d'avant de la deuxième machine se trouve ainsi facilité, et d'autant plus que l'avant de cette machine a plus de porte-à-faux par rapport au premier essieu.

Les jeux des essieux, augmentant la déviation des machines, aggravent tous ces inconvénients, lorsqu'on arrive à la limite de ces jeux dans le mouvement de déviation.

Les tampons agissent encore d'une autre façon sur le mouvement de lacet, et cette action est même la plus importante, sauf dans les cas particuliers que nous avons examinés ci-dessus.

Quand il y a déplacement relatif des tampons de deux véhicules dont l'attelage est serré, il se produit des forces de frottement qui s'opposent à ce déplacement relatif. Soient : $Q_0 + Q_1$, la réaction des tampons ; $f$, le coefficient de frottement. S'il y a déplacement relatif de la locomotive par rapport au tender, la force du frottement entre tampons est : $2f\,(Q_0 + Q_1)$. La distance des tampons au centre de gravité de la locomotive étant $l$, le moment de cette force de frottement par rapport au centre de gravité est : $2fl\,(Q_0 + Q_1)$. Ce moment, qui s'oppose au lacet de la machine, a, dans un attelage bien serré, une très grande valeur, parce que $l$ est grand, et l'effort nécessaire pour que la locomotive entraîne le tender dans son déplacement est presque toujours moindre que la force de frottement des tampons.

En général, les deux véhicules peuvent être considérés comme liés l'un à l'autre : il n'y a entre eux aucun déplacement relatif, et ils exercent l'un sur l'autre une réaction F inférieure à la force de frottement des tampons.

Le mouvement de la locomotive a donc pour équation



différentielle :

$$(1) \qquad I\,\frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M - lF\,;$$

et celui du tender :

$$(2) \qquad I'\,\frac{d^2\theta'}{dt^2} = M' - l'F.$$

En prenant la différence de ces équations, on a une relation entre les deux inconnues $\theta$ et $\theta'$. On en obtient une seconde en exprimant qu'il n'y a pas de mouvement relatif entre les deux véhicules, ou bien que leurs axes se coupent toujours en un même point. Les centres de gravité se trouvant aux distances $\zeta$ et $\zeta'$ de l'axe de la voie, le point de la locomotive qui est à la hauteur des tampons se trouve à la distance $\zeta + l\theta$ de l'axe de la voie, et le même point de l'axe du tender à une distance $\zeta' - l'\theta'$. Ces deux quantités restant égales, on a :

$$\zeta + l\theta = \zeta' - l'\theta',$$

ou en différentiant :

$$\frac{d\zeta}{dt} + l\,\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\zeta'}{dt} - l'\,\frac{d\theta'}{dt}.$$

Nous avons vu que, quand la locomotive est seule, on a :

$$\frac{d\zeta}{dt} = V\theta.$$

De même, quand le tender est seul :

$$\frac{d\zeta'}{dt} = V\theta'.$$

Ces deux relations ne cessent pas d'être vraies, quand on tient compte du frottement des tampons. Nous avons vu, en effet, au § IX, que, pour annuler le déplacement latéral du centre de gravité, il faut exercer une réaction égale

à la résultante des forces de frottement qui se développent quand ce déplacement n'a pas lieu, et que cette résultante est égale au poids du véhicule multiplié par le coefficient de frottement. Comme sa valeur est toujours plus grande que la force de frottement des tampons, celle-ci ne peut faire obstacle au déplacement latéral des deux véhicules, locomotive et tender, qui s'effectue l'un avec la vitesse $V\theta$, et l'autre avec la vitesse $V\theta'$.

La loi du mouvement est donc donnée par le système des deux différentielles (1) et (2), auquel il faut joindre la condition :

$$V\theta + l\frac{d\theta}{dt} = V\theta' - l'\frac{d\theta'}{dt}. \tag{3}$$

Ce système ne peut, d'ailleurs, pas être résolu directement, parce que M est fonction de $\theta$, et M′ de $\theta'$. Mais il permet de trouver la marche à suivre pour avoir la solution par approximations successives, à l'aide d'une méthode graphique.

Cette méthode, de même que celle du § VI, est basée sur la remarque suivante.

Pendant les intervalles, toujours petits, où N peut être supposé constant, les vitesses $\frac{d\theta}{dt}$ et $\frac{d\theta'}{dt}$ restent sensiblement constantes. Supposons, en effet, que, à l'origine d'un de ces intervalles, on connaisse $\theta$ et $\theta'$. A une valeur donnée de F correspond une certaine vitesse $\frac{d\theta}{dt}$, pour la locomotive, qu'on trouve comme il a été dit au § VI, et de même une certaine vitesse $\frac{d\theta'}{dt}$ pour le tender. Il faut et il suffit que les valeurs de ces deux vitesses satisfassent à la relation (3), et on fait varier F jusqu'à ce qu'on arrive à ce résultat.

Nous donnerons au § XIX un exemple qui précisera l'application de cette méthode.



En résumé, le serrage des tampons établit une solidarité entre la locomotive et le tender, qui a pour effet de diminuer l'amplitude du mouvement de lacet. Mais cette solidarité n'est pas absolument complète, parce que, dans certains cas, le frottement des tampons est insuffisant pour empêcher le déplacement relatif des véhicules et parce que, à moins de vérifier constamment l'attelage, on n'est jamais sûr d'avoir un serrage convenable des tampons. Il existe des attelages entre locomotive et tender où la solidarité est absolument complète, sans qu'elle nuise à la circulation en courbe. Ils sont caractérisés par cette condition que les axes des deux véhicules se coupent toujours en un même point, autour duquel ils peuvent librement tourner, comme s'il y avait une articulation simple en ce point. Nous les appellerons pour cette raison *attelages convergents*. Une étude très complète en a été faite par un auteur allemand, M. Hartmann (*Theorie der Locomotiv-Tender-Kuppelungen ;* Berlin, 1884). Nous allons en donner le résumé dans les deux paragraphes suivants.

## XV. — **Circulation des locomotives munies d'attelages convergents dans les courbes.**

La première question à résoudre est de savoir en quel point de l'axe de la locomotive il faut placer l'articulation de l'attelage.

Supposons que la locomotive AB (*fig.* 17) et le tender CD soient placés sur une courbe, de façon que les axes des essieux extrêmes, formant empattement rigide, de chacun des véhicules, soient sur une même circonférence, par exemple sur l'axe de la voie. C'est là évidemment la position la plus favorable que les deux véhicules puissent occuper sur la voie. Les axes AB et CD, qui sont des sécantes de cercle, se coupent en un point F, et on a

la relation :

$$\overline{FA} \times \overline{FB} = \overline{FC} \times \overline{FD}.$$

Soient : $p$, la distance FB ; $p_1$, la distance FC. Nous les supposons constantes et leur somme égale à la distance, $t$, entre le centre de l'essieu arrière de la locomotive et le

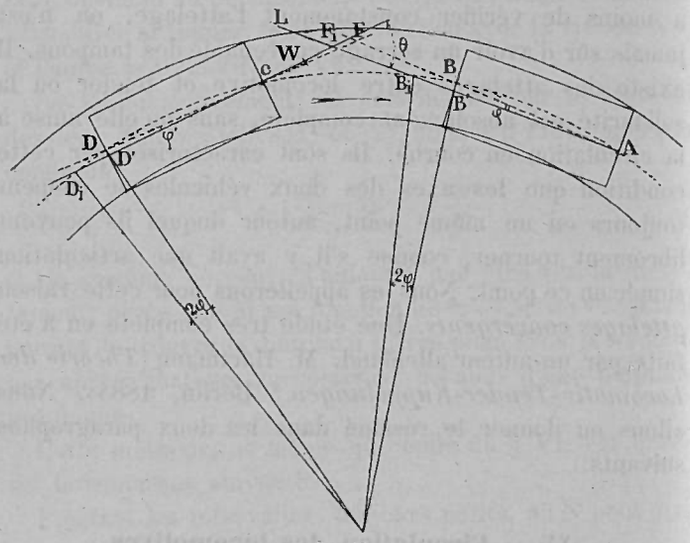



Fig. 17.

centre de l'essieu avant du tender, distance fixe également. Soient, en outre, $s$ et $s_1$ les empattements de la locomotive et du tender.

La relation ci-dessus s'écrit :

$$\frac{p}{p_1} = \frac{p_1 + s_1}{p + s}.$$

Combinée avec : $p + p_1 = t$, elle donne pour $p$ et $p_1$ :

$$(1) \quad \begin{cases} p = \dfrac{t(s_1 + t)}{s + s_1 + 2t} \\ p_1 = \dfrac{t(s + t)}{s + s_1 + 2t} \end{cases}$$



Ces deux quantités $p$ et $p_1$ caractérisent un point F qui est appelé *point d'intersection théorique des axes*.

Si les centres des essieux extrêmes restaient toujours sur une même circonférence, il n'est pas douteux que le point d'accouplement devrait se trouver au point théorique F. Mais, par suite de la succession de courbes de rayons différents et par suite du jeu de la voie, les centres ne peuvent toujours rester sur une même circonférence, et il s'agit de savoir si, malgré cela, le point théorique F est resté le point le plus favorable pour l'accouplement.

*Circulation dans une courbe de rayon constant. — Marche avant.* — Quand deux véhicules reliés entre eux par un accouplement libre, c'est-à-dire leur permettant de prendre une position angulaire indépendante, circulent en courbe, le boudin de la roue extérieure d'avant et celui de la roue intérieure d'arrière entrent en contact avec le rail. Soit (*fig.* 17) AB l'axe de la locomotive dans la position normale, pour laquelle les boudins des roues extérieures d'avant et d'arrière touchent au rail extérieur ; cet axe tourne autour du centre A de l'essieu d'avant d'un angle $\varphi$, jusqu'à ce que le boudin de la roue intérieure d'arrière arrive au contact du rail intérieur. Cette roue d'arrière se sera ainsi déplacée d'une quantité BB' égale au jeu total $\varepsilon$ de la voie, et on a par suite, $s$ étant l'empattement AB :

$$s\varphi = \varepsilon.$$

L'axe AB' de la machine rencontre la circonférence passant par A au point $B_i$, et la longueur $AB_i$ est appelée l'*empattement fictif*. L'angle au centre $B'MB_i$ est d'ailleurs égal à $2\varphi$, et la longueur $B'B_i$ égale à $2R\varphi = \dfrac{2R\varepsilon}{s}$. Par suite :

$$(2) \quad AB_i = s + \frac{2R\varepsilon}{s}.$$

On obtient de même pour le tender, qui tourne d'un

angle $\varphi' = \frac{\varepsilon}{s_1}$, l'empattement fictif :

$$CD_i = s_{1i} = s_1 + \frac{2R\varepsilon}{s_1}. \tag{3}$$

Les deux axes $AB_i$ et $CD_i$ se coupent en un point $F_i$ dont il est facile de déterminer la position. En effet, les angles $\theta$, $\varphi$ et $\varphi'$ étant très petits, on a :

$$t_i = CF_i + F_iB_i = CF_i + F_iB' - B_iB' = t - \frac{2R\varepsilon}{s}.$$

En appliquant le théorème des sécantes de cercle, il vient :

$$B_iF_i = p_i = \frac{t_i(s_{1i} + t_i)}{s_i + s_{1i} + 2t_i}; \tag{4}$$

$$F_iC = p_{1i} = \frac{t_i(s_i + t_i)}{s_i + s_{1i} + 2t_i}. \tag{5}$$

Ces valeurs contenant R et $\varepsilon$, il en résulte que la position du point d'intersection $F_i$ dépend du rayon de la courbe et du jeu de la voie. A la vérité, elle ne dépend que du produit $R\varepsilon$, qu'on pourrait, si l'on voulait, maintenir constant en calculant $\varepsilon$ en fonction de R.

Une conclusion importante se dégage de ce qui précède, quand l'on suppose que les deux véhicules sont liés entre eux par un attelage convergent, tel que les axes se coupent en un point W, appelé *point d'intersection réel*. Si ce point W se trouve entre $F_i$ et C, il doit se produire nécessairement un déraillement de l'essieu avant du tender, ou de l'essieu arrière de la machine. On voit, en effet, sur la *fig.* 17 que, pour que l'axe de la locomotive AL passe sur le point W, il faut ou que l'essieu arrière B sorte dans l'intérieur de la courbe ou que l'essieu avant, C, du tender sorte vers l'extérieur. Donc, dans un attelage convergent, le point $F_i$ donne la limite vers l'arrière de la position que peut occuper le point d'articulation W.



*Marche arrière.* — En considérant la marche arrière, on obtient la même limite vers l'avant. Soit $F'_i$, le point d'intersection fictif des axes; affectons d'un accent les quantités (qui nous ont servi à déterminer $F_i$) se rapportant à la marche arrière. Il vient pour les coordonnées de $F'_i$ :

$$p'_i = \frac{t'_i(s'_{1i} + t'_i)}{s'_i + s'_{1i} + 2t'_i}; \tag{6}$$

$$p'_{1i} = \frac{t'_i(s'_i + t'_i)}{s_i + s'_{1i} + 2t'_i}. \tag{7}$$

En résumé, le point d'articulation doit se trouver entre $F_i$ et $F'_i$, pour qu'il n'y ait pas de déraillement à craindre ni dans la marche avant, ni dans la marche arrière.

En cherchant la position de ces points pour des locomotives munies d'attelages convergents, par exemple pour les locomotives des chemins de fer de l'État qui sont munies de l'attelage convergent système Edmond Roy, on voit que la position des points $F_i$ et $F'_i$, laisse ordinairement une assez grande liberté dans le choix du point d'articulation W.

On peut se proposer de chercher où doit être placé W pour que le jeu de la voie nécessaire soit minimum.

Exprimons les valeurs de $p_{1i}$ et $p'_i$ (formules 5 et 6) en fonction de $t$, $s$, $s_1$, R et $\varepsilon$. Il vient :

$$p_{1i} = \frac{\left(t - 2R\frac{\varepsilon}{s}\right)(s + t)}{s + s_1 + 2t + 2R\varepsilon\left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s}\right)};$$

$$p'_i = \frac{\left(t - 2R\frac{\varepsilon}{s}\right)(s_1 + t)}{s + s_1 + 2t + 2R\varepsilon\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s_1}\right)}.$$

En résolvant par rapport à $\varepsilon$, on a, pour la marche avant :

$$\varepsilon = \frac{1}{2R}\,\frac{t(s + t) - p_{1i}(s + s_1 + 2t)}{p_{1i}\left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s}\right) + 1 + \frac{t}{s}}; \tag{8}$$

et pour la marche arrière :

$$(9) \qquad \varepsilon' = \frac{1}{2R}\,\frac{t\,(s_1 + t) - p'_i\,(s + s_1 + 2t)}{p'_i\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s_1}\right) + 1 + \frac{t}{s_1}}.$$

Dans ces deux expressions (8) et (9), on peut annuler les numérateurs en posant :

$$(10) \qquad \begin{cases} p_{1i} = \dfrac{t\,(s + t)}{s + s_1 + 2t}\,; \\ p'_i = \dfrac{t\,(s_1 + t)}{s + s_1 + 2t}. \end{cases}$$

La valeur minima de $\varepsilon$, aussi bien que celle de $\varepsilon'$, est donc zéro. En comparant les formules (1) et (10), on voit qu'alors $p_{1i}$ et $p'_i$ sont les coordonnées du point théorique F.

Ainsi, quand le jeu est nul, le point d'articulation réel doit coïncider avec le point théorique. Si cette coïncidence n'existe pas, le jeu est nécessaire et doit être inversement proportionnel au rayon de la courbe, comme cela résulte des formules (8) et (9).

Cette conclusion est très importante. Elle montre que le surécartement dans les courbes est absolument inutile, pourvu que la locomotive et le tender soient accouplés en un point convenable.

*Circulation de deux véhicules munis d'attelages convergents dans des courbes de rayons variables.* — Considérons deux courbes de rayons R et $R_1$, tangentes à leur point de contact. Nous étudierons la position des véhicules pendant le passage d'une courbe à l'autre.

On peut immédiatement distinguer les cas suivants :

1° Le point d'intersection $F_0$ des axes des deux véhicules se trouve du côté de la courbe à plus grand rayon par rapport à la ligne des centres $M_1M$ (*fig.* 18) ;

2° Le point $F_0$ se trouve sur la ligne des centres ;

3° Le point $F_0$ se trouve du côté de la courbe à plus petit rayon par rapport à la ligne des centres.



Soient, en outre des notations déjà connues :

$q = BN$, distance de l'essieu d'arrière de la locomotive au point de rencontre N des deux courbes ;

$q_1 = NC$, distance du point N à l'essieu d'avant du tender ;

$v = BF_0$, distance du point $F_0$ à l'essieu d'arrière de la machine ;

$v_1 = F_0C$, distance du point $F_0$ à l'essieu d'avant du tender.

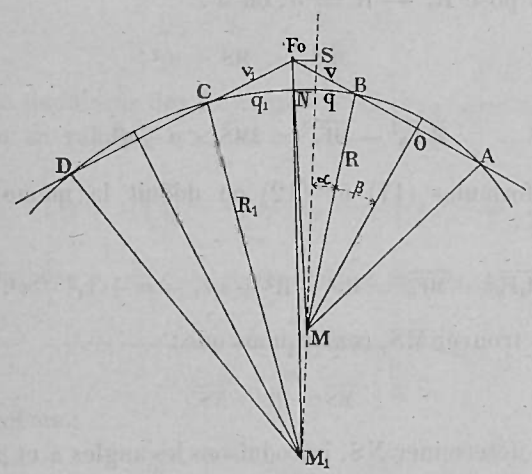



FIG. 18.

On a, par suite :

$$v + v_1 = t.$$

Pour trouver $v$ et $v_1$, dans le cas où les véhicules occupent la position normale, on a les relations suivantes (*fig.* 18) :

$$\overline{MF_0}^2 = \overline{MO}^2 - \left(\frac{s}{2} + v\right)^2;$$

$$\overline{MO}^2 = R^2 - \left(\frac{s}{2}\right)^2;$$

$$(11) \qquad \overline{MF_0}^2 = R^2 + sv + v^2.$$

On a de même :

$$\overline{M_1F_0}^2 = R_1^2 + s_1v_1 + v_1^2; \tag{12}$$

des deux triangles $MF_0S$ et $M_1F_0S$ on tire :

$$\overline{MF_0}^2 = \overline{MS}^2 + \overline{F_0S}^2;$$
$$\overline{M_1F_0}^2 = \overline{M_1S}^2 + \overline{F_0S}^2;$$
$$\overline{M_1F_0}^2 - \overline{MF_0}^2 = \overline{M_1S}^2 - \overline{MS}^2.$$

Si on pose $R_1 - R = d$, on a :

$$\overline{M_1S}^2 = (MS + d)^2;$$

d'où :

$$\overline{M_1F_0}^2 - \overline{MF_0}^2 = 2\overline{MS} \times d + d^2. \tag{13}$$

Des formules (11) et (12) on déduit la même différence :

$$\overline{M_1F_0}^2 - \overline{MF_0}^2 = R_1^2 - R^2 + s_1v_1 - sv + v_1^2 - v^2. \tag{14}$$

Pour trouver MS, remarquons que :

$$\overline{MS} = R + \overline{NS}.$$

Pour déterminer NS, introduisons les angles $\alpha$ et $\beta$, dont les valeurs sont :

$$\alpha = \frac{q}{R},$$
$$\beta = \frac{s}{2R}.$$

L'angle $\delta = \widehat{SF_0B}$ est égal à $\alpha + \beta$, comme on le voit en abaissant de B une perpendiculaire sur MS et menant la tangente en B. Donc :

$$\delta = \frac{2q + s}{2R}.$$

D'ailleurs, la longueur NS peut être considérée avec



une très grande approximation comme étant la projection de $F_0B$ sur MS. Par suite :

$$\overline{NS} = v \sin \delta,$$

ou, en remplaçant le sinus par l'arc, à cause de la faible valeur de $\delta$ :

$$\overline{NS} = v. \frac{2q + s}{2R}.$$

On a donc :

$$MS = R + v. \frac{2q + s}{2R}. \tag{15}$$

Nous déduisons des formules (13) et (14), en remplaçant MS par sa valeur :

$$v(2q + s)\left(\frac{R_1}{R} - 1\right) = s_1v_1 - sv + v_1^2 - v^2.$$

Si on pose $v_1 = t - v$, on obtient finalement :

$$v = \frac{t(s_1 + t)}{s + s_1 + 2t + (2q + s)\left(\frac{R_1}{R} - 1\right)}, \tag{16}$$

et de même :

$$v_1 = \frac{t(s + t) + t(2q + s)\left(\frac{R_1}{R} - 1\right)}{s + s_1 + 2t + (2q + s)\left(\frac{R_1}{R} - 1\right)}. \tag{17}$$

Quand $F_0$ se trouve du côté de la courbe à plus petit rayon, on obtient des formules (16 *bis*) et (17 *bis*) analogues à (16) et (17) ; comme il suffit de remplacer $v$ par $v_1$, $s$ par $s_1$, et inversement, il est inutile d'écrire ces formules.

Les coordonnées du point $F_0$ sont donc variables et dépendent de la position des véhicules sur la courbe. La position réelle des véhicules doit d'autant plus s'éloigner de la position normale (que nous avons admise au début

des calculs ci-dessus) que le point d'accouplement réel W est plus éloigné du point $F_0$.

Supposons, par exemple, que le point W se trouve voisin du point théorique F.

Les formules (16) et (17) font connaître que $v$ est d'autant plus petit, et, par suite, $v_1$ d'autant plus grand que $q$ est plus grand, pour une valeur déterminée du rapport $\frac{R_1}{R}$; $q$ est maximum quand $F_0$ tombe sur la ligne des centres. C'est donc dans ce cas que la position des véhicules sera le plus éloignée de la position normale.

Lorsque $F_0$ est du côté de la courbe à plus petit rayon les formules (16 *bis*) et (17 *bis*) conduisent à la même conclusion.

En outre, on voit que $v$ diminue à mesure que $R_1$ augmente et qu'alors le point $F_0$ s'éloigne de plus en plus du point W.

Il résulte des deux observations qui précèdent que la position des véhicules la plus éloignée de la position normale se rencontre quand on passe d'un alignement à une courbe, et quand le point d'intersection des axes se trouve à la séparation de l'alignement et de la courbe.

En calculant le jeu de la voie dans ce cas, nous aurons le jeu maximum.

Considérons dans la *fig.* 19 les deux véhicules accouplés au point $W_1$ du tender. Dans la position normale de la locomotive le point d'accouplement tombe en $W_0$ et non en $W_1$. Il faut donc supposer que la locomotive tourne autour de A jusqu'à ce que $W_0$ vienne coïncider avec $W_1$. Quand cette coïncidence est établie, l'empattement fictif, $AW_1$, de la locomotive est :

$$s' = s + 2R\frac{\varepsilon}{s},$$

et la distance $z = B'W_1$ du point d'accouplement à



l'essieu d'arrière est :

$$z = 2R\frac{\varepsilon}{s}.$$

On en déduit la valeur de $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{sz}{2R}. \tag{18}$$

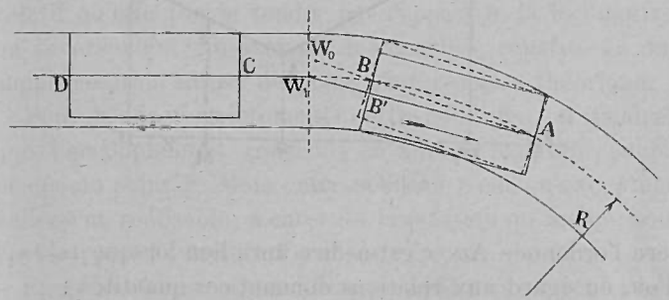



Fig. 19.

Pour la sortie de la courbe, le jeu s'obtient de la même façon. On voit facilement que l'essieu d'avant du tender doit se déplacer vers l'intérieur de la courbe d'une quantité :

$$\varepsilon_1 = \frac{s_1 z_1}{2R}. \tag{19}$$

Finalement, il faudra donner à la courbe un jeu égal à la plus grande des deux valeurs $\varepsilon$ et $\varepsilon_1$.

Quel est le point commun aux axes des deux véhicules pour lequel le jeu est minimum ?

Du moment que $z + z_1 = t$, on a :

$$\varepsilon = \frac{sz}{2R}, \qquad \varepsilon_1 = \frac{s_1 (t - z)}{2R}.$$

En fonction de $z$, $\varepsilon$ représente une droite telle que $E_0E$ (*fig.* 20), et $\varepsilon_1$ une droite $E'_0E'$. Pour avoir $\varepsilon$ et $\varepsilon_1$, pour une valeur $z = E_0M$ quelconque, il suffit d'élever l'ordonnée

passant par M. Il est facile de voir sur la figure que le jeu de la voie sera donné par les ordonnées de la ligne brisée EAE′, suivant la valeur de $z$, et que le minimum du jeu

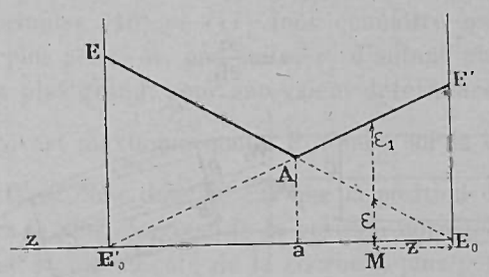



Fig. 20.

sera l'ordonnée A$a$, c'est-à-dire aura lieu lorsque $\varepsilon = \varepsilon_1$ ; d'où, eu égard aux relations donnant ces quantités :

$$z = \frac{s_1 t}{s + s_1}.$$

Le point ainsi obtenu ne coïncide pas avec le point théorique F ; il en est distant de :

$$p - z = \frac{t(s_1 + t)}{s + s_1 + 2t} - \frac{s_1 t}{s + s_1} = \frac{t^2 (s - s_1)}{(s + s_1 + 2t)(s + s_1)}.$$

Cette quantité est nulle, si $s = s_1$. Par conséquent le point F sera d'autant plus rapproché du point le plus favorable pour l'accouplement que les empattements rigides de la locomotive et du tender différeront moins.

En résumé, l'analyse ci-dessus permet de trouver quels sont les jeux de la voie nécessaires pour la circulation en courbe de locomotives reliées à leur tender par des attelages convergents, et elle montre que : dans les courbes de rayon constant, le point théorique F est le point d'articulation le plus avantageux ; au passage d'une courbe à une autre de rayon différent le point F en est d'autant



plus voisin qu'il y a moins de différence entre les empattements rigides de la locomotive et du tender.

## XVI. — Étude cinématique des attelages convergents.

La principale condition à réaliser est que le mouvement relatif qu'effectue le tender par rapport à la locomotive, ou inversement, au passage des courbes, consiste en une simple rotation autour du point d'intersection théorique.

Pour réaliser strictement cette condition, il faudrait que l'accouplement consistât en une articulation simple placée au point F. Mais cette solution n'est qu'exceptionnellement réalisable, à cause de la position qu'occupe souvent le point F, dans le foyer par exemple.

En généralisant la condition précédente, on peut baser le mouvement relatif entre locomotive et tender sur une autre loi, telle que les axes des deux véhicules se coupent constamment en des points voisins du point théorique.

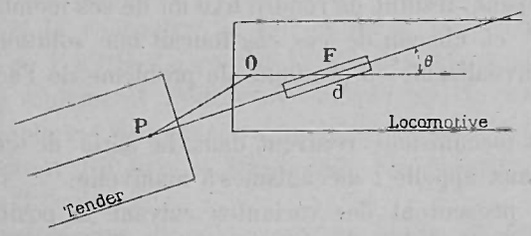



Fig. 21.

On est ainsi amené à choisir parmi un certain nombre de lois de mouvement, et le problème, qui parait tout d'abord indéterminé, peut être résolu par la synthèse cinématique, suivant les méthodes indiquées par Reuleaux.

L'angle $\theta$ (*fig.* 21), que forment les axes de la locomotive et du tender, s'élève, dans les plus fortes courbes, à 5°

au maximum. Supposons les deux véhicules placés dans la position normale (les centres des essieux extrêmes sur une même circonférence ayant pour centre le centre de la courbe) ; leurs axes se coupent au point théorique F. L'attelage consiste ordinairement en une barre OP qui joint un point quelconque O de l'axe de la locomotive à un point quelconque P de l'axe du tender. Supposons que, pour passer de la position conaxiale à celle représentée sur la *fig.* 21, le tender tourne autour du centre O. Le point P engendre alors une circonférence de centre O; d'après la condition posée au début de ce paragraphe, le point P devrait engendrer une circonférence de centre F. Pour réaliser un mouvement voisin de ce dernier, il suffit d'obliger l'axe du tender à glisser sur le point F, fixe sur la locomotive. On pourrait, par exemple, placer en F une coulisse, *d*, mobile autour d'un axe vertical passant par F et, dans cette coulisse, on engagerait l'axe du tender, supposé matérialisé.

Pour faire de la chaîne cinématique de la *fig.* 21 un mécanisme, il suffit de rendre fixe un de ses membres, OF ou PF, et chacun de ces cas fournit une solution, d'ailleurs irréalisable en pratique, du problème de l'accouplement.

Ces mécanismes rentrent dans la série de ceux que Reuleaux appelle : mécanismes à manivelle.

Ils présentent des variantes suivant la position des points O, P et F, et suivant que le point F est supposé fixé à la locomotive ou au tender.

La géométrie cinématique permet de déterminer les lois du mouvement des mécanismes à manivelle.

Considérons le mécanisme de la *fig.* 21 dans lequel le membre OF est supposé fixe. Pendant le mouvement, tous les points de OP décrivent des circonférences de centre O. Mais le point P du membre OP appartient en même temps au membre PF. Donc le mouvement de la



droite PF est tel que l'un de ses points, P, décrit une circonférence de rayon OP, tandis qu'elle est assujettie à passer constamment par le point fixe F (*fig.* 22).

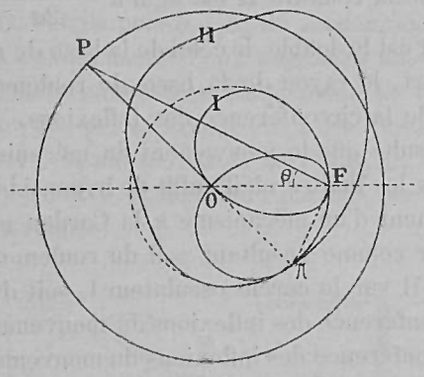



Fig. 22.

Le centre instantané de rotation s'obtient en prenant l'intersection des normales à deux trajectoires quelconques engendrées par deux points de PF. Il se trouve donc en $\pi$, à la rencontre de OP et de la perpendiculaire élevée en F à PF. La courbe I, lieu des points $\pi$, est la base de roulement. Pour avoir la roulette, le moyen le plus simple est de renverser le mouvement, c'est-à-dire de supposer PF fixe et OF mobile. On obtient ainsi la courbe II.

Le mouvement du mécanisme de la *fig.* 21 est donc ramené au roulement de la courbe I sur la courbe II.

Or, l'angle que font les axes de la locomotive et du tender, dans le cas le plus défavorable (passage d'une courbe de 180 mètres de rayon), est au maximum de 5° ; il en résulte qu'au point de vue du mouvement du mécanisme d'accouplement, il n'est utile de tenir compte que des parties des courbes I et II, voisines du point F ; et ces parties peuvent être remplacées avec une très grande

approximation par leurs cercles osculateurs respectifs.

Si on cherche les rayons de courbure des courbes I et II on trouve que, lorsque PF coïncide avec OF, le rayon de courbure de la roulette II est égal à $\frac{c(a+c)}{2a}$ ($a = OP$, $c = OF$) et est le double de celui de la base de roulement I. D'autre part, le rayon de la base de roulement est égal au rayon de la circonférence des inflexions.

Il en résulte que le mouvement du mécanisme à manivelle, dans les limites où il suffit de le considérer, revient au mouvement d'un mécanisme à la Cardan et qu'on peut le regarder comme résultant soit du roulement du cercle osculateur II sur le cercle osculateur I, soit du roulement de la circonférence des inflexions du mouvement direct III sur la circonférence des inflexions du mouvement inverse I (*fig.* 23). Dans cette figure, les hachures indiquent les membres supposés fixes.

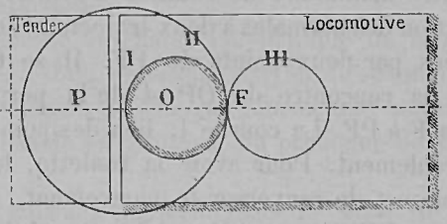



FIG. 23.

Maintenant que le mouvement relatif qu'effectuent la locomotive et le tender l'un par rapport à l'autre est ramené au roulement de deux cercles connus, on peut :

1° Trouver des mécanismes d'accouplement réalisant ce mouvement ;

2° Reconnaître si les accouplements employés dans la pratique satisfont aux conditions théoriques.

*Accouplement formé de trois barres d'attelage* (*fig.* 24). — La locomotive (cercle I) est supposée fixe et le tender



(cercle II) est mobile. Dans le roulement du cercle II sur le cercle I, le point P engendre une cardioïde qui, pour la position indiquée du point P, est osculatrice avec le cercle décrit de O comme centre avec le rayon OP. Si on prend deux autres points $A_1A_2$ du tender, symétriques par rapport à l'axe, chacun d'eux engendre une cardioïde dont on peut déterminer très simplement le centre de courbure $B_1$ ou $B_2$, par la construction de Savary. L'accouplement sera formé par trois barres $A_1B_1$, OP, $A_2B_2$ reliées à la locomotive et au tender par des chevilles placées à leur extrémité.

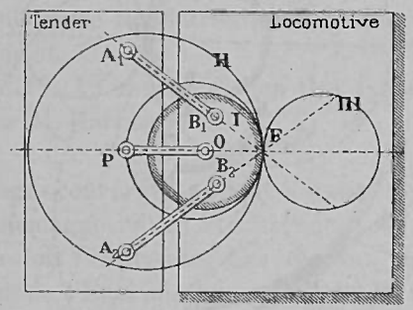



FIG. 24.

Un tel attelage constituerait en réalité une liaison invariable, si l'on ne ménageait un certain jeu entre les chevilles et les œilletons des barres d'attelage.

Il est possible de donner aux trois barres des longueurs égales ; il suffit de déterminer convenablement la position des points $A_1$ et $A_2$ en partant de l'hypothèse que le rayon de courbure de la cardioïde engendrée par ces points doit être égal à OP.

*Accouplement formé de barres d'attelage et de tampons.* — Le rôle rempli par les deux barres d'attelage $A_1B_1$,

$A_2 B_2$, peut l'être également, et avec moins d'inconvénients pratiques, par deux couples de tampons profilés d'une façon convenable.

Considérons la *fig.* 25 et adaptons au tender un profil quelconque *aa*; il enveloppe dans le mouvement déterminé par le roulement du cercle II sur le cercle I un autre profil *bb*, qui peut être fixé à la locomotive.

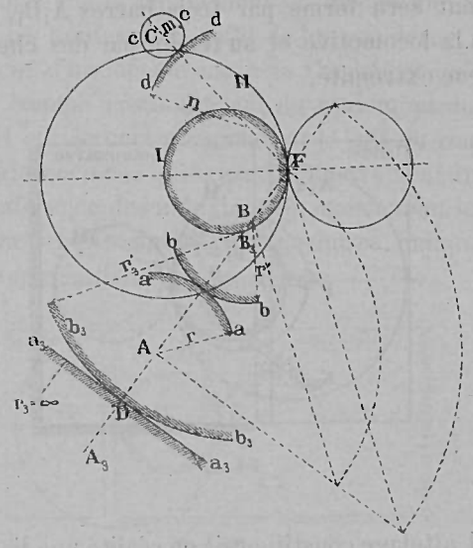



FIG. 25.

Supposons, par exemple, que le profil *aa* soit un arc de cercle ayant son centre en A.

Dans le mouvement du tender par rapport à la locomotive, le point A engendre un élément de cardioïde dont le centre de courbure se trouve en B. L'arc de cercle *aa*, lié au mouvement du point A, enveloppe une courbe *bb*, équidistante de la cardioïde engendrée par A et ayant par suite même centre de courbure B. Le profil *bb* peut donc, pour une faible amplitude angulaire du mouvement,



être remplacé par un arc de cercle de rayon BA — A*a*.

Si on suppose que le point A du système II s'éloigne à l'infini, le centre de courbure correspondant, B, se trouve sur la circonférence des inflexions du mouvement inverse, c'est-à-dire sur la circonférence I. Par conséquent, on peut prendre sur un rayon quelconque issu de F, en un point quelconque D, un profil plan $a_3 a_3$ et on a en $DB_3$ immédiatement le rayon de courbure du profil correspondant.

Si le rayon *m* d'un profil enveloppant est suffisamment petit, comme cela a lieu au point C, le profil *cc* peut être réalisé au moyen d'un rouleau. C'est là, d'après M. Hartmann, le profil le plus convenable parce que le glissement qui se produit entre les autres profils est transformé ici en un roulement.

La *fig.* 1 (Pl. V) représente un des types d'attelage imaginés par M. Hartmann.

Les attelages convergents, dont il existe de nombreux types en Allemagne, n'ont été appliqués en France que d'une façon fort restreinte. Les réseaux de l'Ouest et surtout celui de l'État ont mis en usage le système de tampons de M. Edmond Roy, qui constitue un attelage convergent, assez éloigné du reste de satisfaire aux conditions théoriques qui ont été exposées plus haut.

Les attelages convergents présentent tous, à un degré plus ou moins grand, l'inconvénient de rendre difficiles les déplacements relatifs de la locomotive et du tender, parce que, pour peu que l'accouplement soit serré, il se développe entre les tampons secs des forces de frottement considérables. En outre, il faut remarquer que le rayon de courbure des profils doit ou rester constant ou aller en diminuant à partir du point de contact correspondant à la position conaxiale. L'usure tend, au contraire, souvent à le faire aller en augmentant ; elle modifie en tout cas la forme de ces profils, qu'il est essentiel de conserver

constante. Dès lors le déplacement n'est plus possible et la liaison est invariable.

Il en résulte que les attelages convergents provoquent, ainsi que la constatation en a été souvent faite sur les Chemins de fer de l'État, de fréquentes ruptures d'attelage. On ne peut éviter ces ruptures qu'en ne serrant pas l'accouplement, auquel cas il n'a plus l'efficacité en vue de laquelle il a été créé et est inférieur, à tous les points de vue, à l'attelage ordinaire.

Il y a lieu de supposer que l'attelage de M. Hartmann, où les tampons du tender sont des rouleaux, ce qui remplace le frottement par un roulement, et où rien n'empêche de munir le tendeur principal d'un ressort de traction, évite la plupart des inconvénients signalés et présente une mobilité suffisante, tout en conservant son efficacité. J'ignore si des applications de cet attelage ont été faites jusqu'ici soit en Allemagne, soit ailleurs.

Au fond, l'influence de l'accouplement convergent est à peu près identique à celle de l'accouplement ordinaire, lorsque celui-ci est bien serré. L'un et l'autre tendent à diminuer la déviation de la locomotive, tant en alignement qu'en courbe, et par suite à atténuer en alignement le mouvement de lacet, en courbe la poussée radiale.



# CHAPITRE III.

## APPLICATION DE L'ÉTUDE DU MOUVEMENT DE LACET A UNE LOCOMOTIVE A VOYAGEURS A DEUX ESSIEUX ACCOUPLÉS ET A DEUX ESSIEUX PORTEURS, L'UN A L'AVANT, L'AUTRE A L'ARRIÈRE.

### XVII. — **Machine seule.**

Une locomotive peut être considérée comme seule, lorsque l'attelage avec le tender est desserré.

Prenons comme exemple la locomotive dont la silhouette et les données principales sont indiquées sur la *fig.* 1 (Pl. VI). Les boîtes à graisse des roues d'avant et d'arrière sont supposées munies de plans inclinés à 10 p. 100, permettant un déplacement de 15 millimètres de chaque côté.

Le moment d'inertie d'une telle locomotive est d'environ 20.000, les unités étant le mètre et la masse du kilogramme.

La conicité de toutes les roues est supposée la même et égale à $\frac{1}{15}$. Le demi-jeu de la voie en alignement est de 12 millimètres.

Nous supposerons que la vitesse est de quatre tours par seconde, ce qui donne, les roues motrices ayant 2 mètres de diamètre, $V = 25^{m},13$ par seconde, soit $90^{km},468$ à l'heure.

Nous étudierons le mouvement de lacet en alignement.

A l'origine du temps, $t = 0$, nous supposons que $\theta = 0$. Les valeurs de $\zeta$, déplacement latéral du centre de gravité,

et de $\frac{d\theta}{dt}$, vitesse angulaire, sont, comme nous l'avons vu au § VI, la première très voisine du demi-jeu de la voie, $\varepsilon$, et la seconde très faible.

Supposons que pour $\theta = 0$, le centre de gravité de la locomotive soit à droite de l'axe de la voie. La rotation commencera à s'effectuer vers la gauche, car, si elle ne s'effectuait pas, toutes les forces de frottement des roues sur les rails donneraient un moment $M = \Sigma f Pe$, tendant à faire tourner vers la gauche et ayant une valeur élevée, 3382 dans notre exemple ; ce moment peut être inférieur au moment N des forces agissant sur les longerons (*fig.* 5, Pl. VI), quand celui-ci est de signe contraire et voisin de son maximum ; mais cela n'a lieu que pendant un temps très petit. Le mouvement s'effectuera donc dès qu'on aura en valeur absolue : $M > N$, quand N est de signe contraire à M.

Au début, la rotation peut être contrariée par le contact avec le rail des boudins des roues d'arrière. En effet, si, pour $\theta = 0$, on a : $\zeta = \varepsilon$, tous les boudins des roues de droite sont en contact avec le rail, à moins, ce qui est souvent le cas, qu'ils ne soient usés inégalement et qu'alors le jeu de la voie ne diffère légèrement d'un essieu à l'autre. Dans le mouvement de rotation de droite à gauche, les boudins des roues placées en arrière du centre de gravité tendent à s'éloigner de l'axe de la voie, mais en sont empêchés par leur contact avec le rail, si ce contact existe pour $\theta = 0$. Il faut alors, pour que la rotation soit possible, que le bâti puisse se déplacer par rapport aux deux essieux d'arrière. L'essieu porteur d'arrière étant muni de plans inclinés, le bâti peut se déplacer en surmontant la résistance qu'ils déterminent. Quant à l'essieu accouplé, il est rare qu'il n'ait pas un certain jeu, de 1/2 à 1 millimètre ; par suite, le bâti peut commencer sa rotation. Quand même cet essieu accouplé n'aurait absolument



aucun jeu, la rotation serait encore possible, car la face verticale des rails, en contact avec les boudins, n'est pas rigoureusement un plan équidistant de l'axe de la voie ; aux joints des rails, par exemple, il y a toujours des inégalités appréciables.

Il suffit, d'ailleurs, d'un jeu très petit pour que la rotation prenne naissance et continue à se développer. Ce jeu très petit permet, en effet, une déviation $\theta_0$ également très petite, après quoi la distance $\zeta_3$ du boudin de la roue accouplée à l'axe de la voie ne peut plus augmenter et reste constante. On a donc : $\zeta_3 = \zeta + l_3\theta$, relation qui montre que $\theta$ ne peut plus augmenter qu'autant que $\zeta$ diminue. Or, $\zeta$ diminue effectivement en raison de la vitesse latérale $V\theta$ qui porte le centre de gravité vers l'intérieur de la voie ; donc $\theta$ peut augmenter en satisfaisant à la relation :

$$\frac{d\zeta}{dt} + l_3 \frac{d\theta}{dt} = 0,$$

ce qui donne la loi du mouvement :

$$\theta = \theta_0 e^{\frac{V}{l_3} t} ; \qquad (1)$$

$\theta_0$ étant très petit, $\theta$ et $\frac{d\theta}{dt}$ augmentent d'abord très lentement, ce qui fait que la locomotive parcourt un certain chemin en restant collée au rail de droite.

Le contact du boudin de la roue accouplée avec le rail produit une réaction donnant un moment opposé à la rotation, qui a pour effet de contraindre le mouvement à satisfaire à la relation exponentielle (1). Cette relation reste applicable tant que la vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ déduite de (1) est inférieure à la vitesse qui résulterait du libre jeu des forces produisant les moments M et N. Dès qu'elle est supérieure, la vitesse $\frac{d\zeta}{dt}$ du centre de gravité est plus

grande que $l_3 \frac{d\theta}{dt}$, et le boudin de la roue accouplée s'éloigne du rail.

Le mouvement que nous venons d'analyser ne se produit pas ordinairement ; il suffit à cet effet que l'essieu accouplé ait un jeu de 1 millimètre. En outre, la construction, à laquelle nous procéderons plus loin, montre que, pour $\theta = 0$, $\zeta$ n'est pas tout à fait égal à $\varepsilon$ ; il s'en faut de quelques dixièmes de millimètre.

Nous admettrons donc pour simplifier que rien ne gêne le mouvement au départ ; nous tiendrons seulement compte de la résistance des plans inclinés de l'essieu d'arrière qui jouent tant que : $\zeta + l_4\theta > \varepsilon$.

Le moment N est représenté par la courbe de la *fig.* 5, Pl. IV. Si on fait la quadrature de cette courbe à partir de l'instant où N commence à être positif, nous obtenons la courbe N′ (*fig.* 9, Pl. IV), dont on peut remplacer, comme nous l'avons fait observer au § VI, les branches ascendante et descendante par deux droites. Le début de la rotation peut correspondre à un point quelconque de la courbe N′ ; nous supposerons que c'est au point $n'_0$ ou $n_0$ de la courbe N. Par suite, N reste positif, c'est-à-dire favorise le mouvement, pendant $\frac{6}{100^e}$ de seconde, puis devient négatif, etc.

D'autre part, les moments des forces de frottement de chaque essieu (en supposant la pression des roues sur les points d'appui invariable et, par suite, en négligeant les oscillations des ressorts, en première approximation ; en supposant, en outre, que le coefficient de frottement ou d'adhérence est de $\frac{1}{10}$) sont donnés par l'abaque de la *fig.* 3, Pl. V. Dans cet abaque, chaque quadrant correspond à un essieu.

Il s'agit de construire la courbe de la vitesse $I \frac{d\theta}{dt}$



pendant le premier intervalle de temps de 0″,06 où N reste positif et égal en moyenne à 1.500. La vitesse, si elle est nulle pour $t = 0$, augmente rapidement, puisque M et N sont favorables, jusqu'à une certaine valeur limite pour laquelle M est négatif et égal à N en valeur absolue. Cette valeur limite est facile à trouver en cherchant sur l'abaque pour quelle valeur de $\frac{d\theta}{dt}$ la somme des moments est égale à $-1.500$. Lorsque $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon$, on trouve $M = -1.500$ pour $I \frac{d\theta}{dt} = 140$. On a donc une première courbe approchée de la vitesse, c'est la droite A qui a pour ordonnée constante $I \frac{d\theta}{dt} = 140$ (*fig.* 26). La courbe exacte part de l'origine O et va rejoindre la droite A. Pour en avoir une première approximation, on peut supposer que le moment M conserve la valeur $M_0$ qu'il a pour $t = 0$, $\frac{d\theta}{dt} = 0$. Soit ON′ la droite représentant $\int N dt$. Les valeurs de $\int M_0 dt$ seront aussi représentées par une droite et, par suite, aussi les valeurs de $\int N dt + \int M_0 dt$,

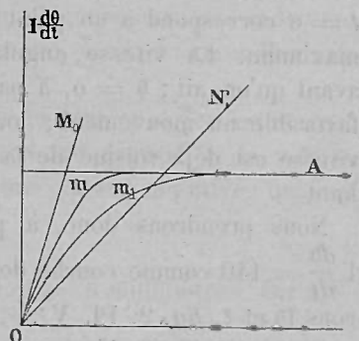


Fig. 26.

par une autre droite telle que $OM_0$ qui constitue la première approximation de la courbe de la vitesse. Avec les valeurs de $I \frac{d\theta}{dt}$ déduites de $OM_0$, nous construirons par points la courbe des moments M et, en faisant la quadrature, nous obtiendrons en seconde approximation la courbe $Om_1$. Elle se trouve, par rapport à $OM_0$,

de l'autre côté de la courbe réelle des vitesses, car les valeurs de M en deuxième approximation sont inférieures aux valeurs réelles, étant déduites de vitesses supérieures aux valeurs réelles. En continuant de la même façon à calculer les valeurs des moments M et des vitesses, on reconnaît qu'on obtient des courbes qui sont successivement de part et d'autre des courbes réelles et qui s'en rapprochent de plus en plus ; elles ont, par suite, ces dernières comme limites. On trouve ainsi la courbe O$m$, qui vient se raccorder tangentiellement avec la droite A.

On en déduit par des quadratures les valeurs de I$\theta$ et de $\Delta\zeta = \int V\theta dt$.

Nous avons supposé ci-dessus que, pour $t = 0$, on a : $\frac{d\theta}{dt} = 0$. Véritablement il n'en est pas ainsi, comme nous le verrons à la fin de notre construction, lorsque l'origine $t = 0$ correspond à un point de la courbe N′ voisin du maximum. La vitesse angulaire se met à augmenter avant qu'on ait : $\theta = 0$, à partir de l'instant où N est favorable au mouvement ; lorsque $\theta$ devient nul, cette vitesse est déjà voisine de la valeur limite calculée plus haut.

Nous prendrons donc, à partir de $t = 0$, la droite $I\frac{d\theta}{dt} = 140$ comme courbe de la vitesse. Nous en déduirons I$\theta$ et $\zeta$ (*fig.* 2, Pl. V).

Pour $t = 0''{,}06$, N change de signe et est négatif en même temps que M. La vitesse angulaire ne peut que diminuer et elle diminuera jusqu'à ce que M change lui-même de signe et acquière une valeur positive égale à N en valeur absolue ; la vitesse correspondante sera la vitesse limite. En prenant comme valeurs de $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$, $\varepsilon_4$, celles correspondant à $t = 0''{,}06$, on trouve que c'est pour la vitesse $I\frac{d\theta}{dt} = 20$ que $M = +2{,}500 = -N$.



La courbe de raccordement, pour passer de la vitesse $\frac{d\theta}{dt} = 140$ à la vitesse $I\frac{d\theta}{dt} = 20$, se construit par approximations successives, comme nous l'avons vu ci-dessus.

Pour $t = 0''{,}15$, N redevient positif. D'après les valeurs de $\zeta$ et de $\theta$ pour $t = 0''{,}15$, on calcule $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$, $\varepsilon_4$, et on trouve sur les abaques que c'est pour la vitesse limite $I\frac{d\theta}{dt} = 130$ que $M = -1.500 = -N$.

Pour $t = 0''{,}31$, N est négatif ; la vitesse diminue jusqu'à zéro.

Pour $t = 0''{,}40$, le centre du premier essieu a passé à gauche de l'axe de la voie, tandis que les centres des autres essieux sont encore à droite. Les valeurs de $\varepsilon_n$ sont du reste les suivantes : $\varepsilon_1 = -1^{mm},2$, $\varepsilon_2 = +2$ millimètres, $\varepsilon_3 = +5^{mm},4$, $\varepsilon_4 = +8^{mm},2$. A partir de $t = 0''{,}40$, la vitesse augmente légèrement ; elle redevient nulle quand le centre du second essieu traverse l'axe de la voie.

Pour $t = 0''{,}56$, le centre du dernier essieu est encore à droite de l'axe de la voie, N est négatif, et la vitesse de rotation tend à prendre une valeur négative, qui est à la limite : $I\frac{d\theta}{dt} = -25$.

Pour $t = 0''{,}68$, I$\theta = 31$, $\zeta = 8$ millimètres. On a :

$$\zeta + l_1\theta = 12 \text{ millimètres} = \varepsilon_1$$

et le boudin de la roue gauche du premier essieu arrive au contact du rail. A ce moment, la déviation $\theta$ de la machine a commencé à diminuer, mais l'ensemble de la machine n'en continue pas moins à se porter vers la gauche, du fait de la vitesse latérale V$\theta$. Seulement, pour que le mouvement puisse continuer, l'essieu d'avant restant fixe par suite du contact avec le rail du boudin de la roue

gauche, il faut que le plan incliné fonctionne, ce qui introduit une résistance nouvelle, dont le moment est, comme on l'a vu au § X :

$$M'_1 = \left(\frac{1}{10} + f'\right)(P'_1 + P'_2)\, l + f\,(P_1 + P_2)\, e,$$

et a une valeur de 4.700 environ. Ce moment est donc très considérable, lorsque l'essieu d'avant n'est pas déchargé, et produit une accélération rapide du mouvement de rotation en sens inverse, tendant à redresser l'axe de la machine.

Dans ce qui précède nous n'avons pas tenu compte de la variation des pressions P des roues sur les points d'appui, sur les rails, variation due aux oscillations des ressorts, et effectivement elle n'a que peu d'influence pendant toute la partie du mouvement considérée jusqu'ici, d'abord parce que cette variation s'effectue rapidement et ensuite parce que, toutes les roues intervenant de la même façon dans la production des forces de frottement, la variation de la somme des moments de ces forces est relativement faible, attendu que la décharge de certaines roues correspond à la surcharge des autres. Mais, au moment où le boudin d'une roue d'avant est en contact avec le rail, il n'en est plus de même, par suite du jeu du plan incliné qui produit une résistance prépondérante, sauf lorsque, eu égard aux oscillations des ressorts, les pressions du bâti sur les boîtes à graisse, $P'_1$ et $P'_2$, sont inférieures à leur valeur normale. Le moment $M'_1$ peut donc varier dans des limites étendues, et le mouvement de rotation subséquent peut présenter deux cas bien distincts.

1° Supposons que l'essieu d'avant ne soit pas déchargé. Le moment $M'_1$ est au moins égal à 4.700 et est négatif. Le moment $N = 1.500$ tend à faire tourner de droite à gauche ; mais, à cause de $M'_1$, la rotation s'effectue réellement en sens inverse, avec une vitesse limite qu'on obtiendra en équilibrant la différence $N + M'_1 = -3.200$ par la somme des moments des forces de frottement des autres roues. On trouve ainsi : $I\frac{d\theta}{dt} = -140$, et la rotation vers la droite s'effectue très vite.



Il y a lieu de remarquer que cette vitesse a une limite dépendant de $\theta$. En effet, pour que le plan incliné joue, il faut que le boudin de la roue gauche ne cesse pas de rester au contact du rail, c'est-à-dire qu'on doit avoir :

$$\zeta + l_1\theta \geq \varepsilon.$$

La condition $\zeta + l_1\theta = \varepsilon$, ou

$$\frac{d\zeta}{dt} + l_1\frac{d\theta}{dt} = V\theta + l_1\frac{d\theta}{dt} = 0,$$

donne la limite que ne doit pas dépasser la vitesse angulaire négative pour que le contact subsiste. Or, à mesure que $\theta$ diminue, $V\theta$ diminue également, tandis que $\frac{d\theta}{dt}$ reste sensiblement constant. Il arrive donc un moment où la vitesse angulaire, d'abord inférieure (en valeur absolue) à $\frac{V\theta}{l_1}$, lui devient égale, et à partir de ce moment le plan incliné cesse de fonctionner. D'autre part, s'il n'exerçait aucune réaction, la vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ se mettrait à diminuer et redeviendrait inférieure à $\frac{V\theta}{l_1}$. Il en résulte que, à partir de l'instant où la condition : $V\theta + l_1\frac{d\theta}{dt} = 0$, est réalisée, il n'y a, il est vrai, aucun déplacement du plan incliné, mais néanmoins il s'y exerce une réaction, inférieure à celle qui serait capable de produire ce déplacement, due à la pression du boudin sur le rail et ayant

pour effet de maintenir la condition ci-dessus, qui devient alors la loi du mouvement.

On en déduit :

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{V}{l_1} t}.$$

Cette condition subsiste tant que la vitesse angulaire, calculée en ne tenant compte que des moments M et N, est inférieure à celle qui se déduit de l'équation exponentielle. Cette première vitesse reste ordinairement inférieure à la seconde tant que N est contraire, mais lui devient supérieure dès que N est favorable à la rotation. Alors le contact du boudin avec le rail cesse, et le mouvement de la machine est libre. Il en résulte que, lorsqu'on arrive à $\theta = 0$, la vitesse de rotation est, comme nous l'avons admis au début, sensiblement égale à la vitesse limite pour laquelle on a $M = N$.

Dans ce cas, il n'y a pas contact avec le rail du boudin de la roue du second essieu ; le choc de la machine sur le rail ne dépend que du poids propre du premier essieu, c'est-à-dire est négligeable, et la réaction statique exercée par le boudin de la roue du premier essieu sur le rail est égale à la réaction du plan incliné, dont le maximum est : $\left(\frac{1}{10} + f'\right)(P'_1 + P'_2)$. Le poids $P'_1 + P'_2$ est égal, lorsque les ressorts ont leur flèche normale, à 10.000 kilogrammes environ ; en admettant : $f' = \frac{1}{20}$, on a :

$$\left(\frac{1}{10} + f'\right)(P'_1 + P'_2) = 1.500 \text{ kilogrammes.}$$

Même en supposant qu'au moment précis où s'exerce la réaction maxima sur le rail, la pression $P'_1 + P'_2$ sur les boîtes à graisse soit doublée, on voit que la réaction latérale du boudin sur le rail ne dépasse pas 3.000 kilogrammes. Cette réaction n'est pas très considérable, et



on peut admettre que, dans le cas qui nous occupe, la locomotive dans son mouvement de lacet n'exerce sur la voie aucune action réellement nuisible.

2° Mais il n'en est pas toujours ainsi. Supposons, en effet, qu'au moment du contact du boudin de la première roue gauche avec le rail l'essieu d'avant soit déchargé de façon que le moment résistant du plan incliné soit 2.500, au lieu de 4.700, ce qui correspond à peu près à une décharge de moitié, parfaitement admissible, comme je l'ai démontré dans l'étude des oscillations des ressorts.

On trouve alors que la vitesse de rotation en sens inverse est seulement $I\frac{d\theta}{dt} = 50$ (en tenant compte de la surcharge des essieux d'arrière correspondant à la décharge de ceux d'avant). En construisant $I\theta$ et $\zeta$ (partie *ab* de la courbe $I\theta$ de la *fig.* 2, Pl. V), on s'aperçoit que le boudin de la roue gauche du second essieu arrive au contact du rail, c'est-à-dire qu'on a : $\zeta + l_2\theta = \varepsilon$, pour $t = 0'',765$, $I\theta = 28$.

Ainsi, il suffit que l'essieu d'avant soit déchargé pendant 8 centièmes de seconde, ou, pour parler plus exactement, il suffit que la décharge moyenne pendant cette durée ait une valeur suffisante, pour que le boudin de la roue du second essieu arrive au contact du rail. Ce fait, qui dépend de la concordance éventuelle des oscillations des ressorts avec les oscillations du lacet de la machine, doit se produire forcément à certains moments et se reproduire même périodiquement. Il suffit, pour s'en assurer, de comparer les courbes représentant les deux espèces d'oscillations; on peut même trouver ainsi l'intervalle, relativement assez grand, qui sépare deux chocs consécutifs du second essieu sur la voie.

Ce second essieu, qui est l'essieu moteur principal, est absolument solidaire du bâti. Par conséquent, au moment du contact du boudin d'une de ses roues avec le rail, toute

la machine se trouve arrêtée et la vitesse V0 est annulée.

L'impulsion de la percussion reçue par le rail a pour mesure la quantité de mouvement perdue et est, par suite, égale à $\frac{\Pi}{g}$ V0, Π étant le poids total de la machine, déduction faite du poids propre de l'essieu d'avant.

Pour I0 = 28, la vitesse V0 = 0m,03513, soit environ 3 centimètres et demi par seconde, V étant égal à 25m,13, soit un peu plus de 90 kilomètres à l'heure :

$$\frac{\Pi}{g} V0 = 4.387 \times 0{,}03513 = 154{,}115.$$

Cherchons, comme terme de comparaison, quelle devrait être la hauteur de chute d'un mouton de 300 kilogrammes, pour qu'il produisit un choc analogue. Nous aurons pour la vitesse de chute, $v_1$ :

$$\frac{300}{g} v_1 = 154{,}115,$$

d'où :

$$v_1 = 5^m{,}02.$$

En appliquant la relation : $h = \frac{v_1^2}{2g}$, nous en déduisons $h = 1^m{,}30$.

Ainsi le choc latéral de la machine sur le rail est le même que celui d'un mouton de 300 kilogrammes tombant de 1m,30 de hauteur.

Ce choc, très considérable, peut parfaitement désorganiser la voie, surtout dans ses parties faibles.

En outre, pendant toute la durée du contact, le boudin exerce sur le rail une poussée latérale, que nous avons étudiée au § IX pour une machine à empattement rigide total. Nous avons vu que cette poussée X est donnée par l'expression :

$$X = F - \frac{\Pi}{g} l_2 \frac{d^2\theta}{dt^2},$$



tandis qu'on a :

$$I_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M + l_2 F.$$

Ici, la valeur F est la résultante des forces de frottement des trois essieux d'arrière, qu'on peut à la limite supposer dirigées suivant ces essieux, et de la réaction des plans inclinés d'avant, qui est dirigée en sens inverse des forces de frottement.

En tenant compte de la décharge de moitié sur l'essieu d'avant et de la surcharge correspondante sur les essieux d'arrière, on a :

1° Pour un coefficient d'adhérence, $f = \frac{1}{10}$ :

$$F = 3.800 - 750 = 3.050,$$
$$l_2 F = 0{,}64 \times 3.050 = 1.952.$$

2° Pour $f = \frac{1}{5}$ :

$$F = 7.600 - 750 = 6.850,$$
$$l_2 F = 0{,}64 \times 6.850 = 3.904.$$

La somme M des moments des forces par rapport au centre de gravité est, pour un coefficient $f = \frac{1}{10}$, M = 6.311. D'où : $M + l_2 f = 8.263$.

En donnant à N la plus forte valeur qu'il peut avoir, soit 4.800, et en supposant que N tende à appliquer le boudin contre le rail, on a :

$$\frac{\Pi}{g} l_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{l_2}\left(1 - \frac{I}{I_2}\right)(N + M + l_2 F)$$
$$= \frac{1}{0{,}64}(1 - 0{,}91)(8.263 - 4.800) = 487.$$

Pour un coefficient d'adhérence de $\frac{1}{10}$, on a donc :

$$X = 3.050 - 487 = 2.563 \text{ kilogrammes.}$$

On trouve de même, pour un coefficient d'adhérence de $\frac{1}{5^e}$:

$$X = 6.850 - 1.381 = 5.470 \text{ kilogrammes.}$$

La poussée latérale de la machine sur le rail acquiert donc, dans certains cas, des valeurs voisines de 6.000 kilogrammes.

Reprenons maintenant l'analyse du mouvement.

A partir du moment où le boudin de la roue de l'essieu moteur est en contact avec le rail, la rotation s'effectue en réalité autour du centre de cet essieu, et non plus autour du centre de gravité. L'équation du mouvement est :

$$I_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M + l_2 F,$$

et elle reste applicable tant qu'on a : $V\theta > l_2 \frac{d\theta}{dt}$.

La valeur $M + l_2F$ reste voisine de son maximum jusque vers la fin de l'intervalle pendant lequel cette condition est réalisée, parce que la valeur $V\theta$ est au début beaucoup plus grande que $l_2 \frac{d\theta}{dt}$.

Posons donc, conformément au calcul fait un peu plus haut, $M + l_2F = 8.263$. $N = 1.500$ et s'oppose au mouvement depuis $t = 0'',765$ jusqu'à $t = 0'',81$. Nous construisons donc facilement la courbe de la vitesse dans cet intervalle de temps. Cette vitesse augmente très rapidement. Pour $t = 0'',83$, on a : $I \frac{d\theta}{dt} = 440$, $l_2 \frac{d\theta}{dt} = 0{,}01508$, $I\theta = 12$, $V\theta = 0{,}015$. La condition $V\theta = l_2 \frac{d\theta}{dt}$ se trouve donc réalisée, et le contact du second essieu avec le rail cesse. A partir d'alors, il ne faut plus tenir compte que de la réaction du plan incliné d'avant pour étudier le mouvement de la machine. La vitesse diminue rapidement,



parce que toutes les forces de frottement donnent des moments opposés et voisins de leur maximum. N est du reste favorable ; la vitesse diminuera donc jusqu'à la valeur limite, 180 environ, pour laquelle les moments N et M se font équilibre. Par conséquent, lorsque $\theta$ devient nul, pour $t = 0'',87$, la vitesse est voisine de cette valeur limite, et on vérifie ainsi que la valeur initiale de la vitesse, que nous avons admise au début, est, dans tous les cas, exacte.

Le déplacement du centre de gravité est, pour $t = 0'',83$, donné par la relation : $\zeta + l_2\theta = \varepsilon$ ; d'où $\zeta = 11^{mm},62$. A l'instant où la machine est redressée, pour $t = 0'',87$, on a : $\zeta = 11^{mm},87$. Il s'en faut donc seulement de 13 centièmes de millimètre que les boudins de toutes les roues soient collés au rail.

Le pas de la demi-oscillation du mouvement de lacet est voisin de 9 dixièmes de seconde. Mais, comme nous l'avons dit au début de ce paragraphe, ce pas peut être beaucoup plus allongé dans certains cas, notamment si l'essieu accouplé n'a pas de jeu.

### XVIII. — **Influence du tender sur le mouvement de lacet.**

Nous allons reprendre l'étude ci-dessus en tenant compte de l'action du tender, qui, comme on l'a dit au § XIV, n'a en alignement une importance réelle que par suite du frottement des tampons.

Considérons un tender dont la silhouette et les données principales sont indiquées sur la *fig.* 4, Pl. VI. Le moment d'inertie par rapport à l'axe passant par le centre de gravité du tender est d'environ 7.000.

Supposons que la pression $Q_0 + Q_1$ d'un tampon sur l'autre soit de 2.840 kilogrammes, ce qui produit une

réaction du tender sur la locomotive, et inversement, de 5.680 kilogrammes. En admettant que le coefficient de frottement des tampons l'un sur l'autre soit de $\frac{1}{5}$, la force de frottement qu'il faut vaincre pour produire un déplacement relatif des tampons est de 1.136 kilogrammes, et cette force de frottement donne, par rapport à l'axe vertical passant par le centre de gravité de la locomotive, un moment égal à 4.540. Ce moment est donc très élevé et capable d'empêcher tout déplacement relatif entre la locomotive et le tender.

Quand ces deux véhicules occupent des positions angulaires $\theta$ et $\theta'$, ils sont animés de vitesses latérales $V\theta$ et $V\theta'$, parce que la force de frottement des tampons, égale à 1.136 kilogrammes et, par suite, inférieure à $f\Pi'$ ($\Pi'$ poids du tender), est incapable d'empêcher ce mouvement latéral. Nous nous trouvons donc bien dans le cas qui a été exposé à la fin du § XIV.

Nous prendrons toujours comme origine du temps l'instant où l'axe de la locomotive est parallèle à la voie : $\theta = 0$. Nous supposons que, à ce moment, $\zeta$ est très voisin du demi-jeu de la voie $\varepsilon$.

On ne peut connaître *a priori* la situation qu'occupe le tender pour $t = 0$, mais il est à présumer que l'angle $\theta'$ n'est pas nul. En effet, la locomotive entraîne le tender dans son mouvement et arrive la première au contact du rail, s'il y a contact. La poussée du rail qui naît de ce contact redresse rapidement l'axe de la machine, tandis que rien de tel ne se passe sur le tender. L'angle $\theta$ doit être alors beaucoup plus petit que $\theta'$ et, lorsque $\theta = 0$, $\theta'$ possède encore une certaine valeur. Cette hypothèse sera, du reste, vérifiée par la construction.

Soit $\varepsilon_0$, la quantité dont un tampon de la locomotive s'est écarté de la position normale, pour laquelle les axes de la locomotive et de la voie coïncident.



Nous prendrons comme valeurs initiales : $\theta = 0$, $\zeta = 11^{mm},9$, $\varepsilon_0 = 11^{mm},9$, $I\theta' = 20$, $\zeta' = 8^{mm},8$.

La locomotive est sur la droite de l'axe de la voie. Elle commence donc son mouvement de rotation de droite à gauche, et la loi de ce mouvement, ainsi que de celui du tender, est donnée par les équations (1), (2) et (3) du § XIV.

Il faut remarquer que, dès son début, la rotation de la locomotive est contrariée par le contact avec le rail du boudin de la roue droite de l'essieu accouplé. Supposons que cet essieu n'ait aucun jeu par rapport au bâti. Nous avons, pour $t = 0$, $\varepsilon - \zeta = 0^{mm},1$. Au moment où l'essieu accouplé se trouvera arrêté par le rail, on aura : $\zeta + l_3\theta_0 = \varepsilon$ ; d'où $\theta_0 = \frac{\varepsilon - \zeta}{l_3}$. Il se produira ensuite une poussée du rail sur l'essieu accouplé, telle que le mouvement de la locomotive obéira à la loi exponentielle connue :

$$\theta = \theta_0 e^{\frac{V}{l_3} t},$$

jusqu'à ce que l'accélération qui se déduit de cette équation, $\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{V^2}{l_3^2}\theta$, devienne égale à l'accélération $\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{I}(N + M + lF)$, due aux forces appliquées. Cette exponentielle est applicable pendant une durée d'autant plus grande que $\theta$ est plus petit.

Le mouvement de la locomotive étant connu, celui du tender s'en déduira par l'équation :

$$V\theta' + l'\frac{d\theta'}{dt} = -V\theta + l\frac{d\theta}{dt},$$

dans laquelle le second membre est connu et égal, en vertu de la relation exponentielle, à :

$$(l - l_3)\frac{d\theta}{dt} = \frac{l - l_3}{l_3} V\theta.$$

L'intégrale de cette différentielle est :

$$\theta' = e^{-\frac{V}{l'}t}\left[\theta'_0 + \int_0^t \frac{l - l_3}{l' l_3} V\theta e^{\frac{V}{l'}t}\, dt\right].$$

On peut donc construire $\theta$ et $\theta'$, ainsi que les vitesses angulaires et les accélérations.

Pour trouver à quel moment l'exponentielle cesse d'être applicable, il faut procéder par tâtonnements. On calcule, à cet effet, l'accélération du tender et on en déduit par l'égalité : $I' \frac{d^2\theta'}{dt^2} = M' + lF$, la valeur de $lF$, moment de la réaction des tampons par rapport au centre de gravité du tender; on substitue ensuite la valeur de F dans l'expression $N + M + lF$, qu'on compare à $\frac{V^2}{l_3^2} I\theta$.

Dans notre exemple, l'égalité se produit pour $t = 0'',055$. On a alors, comme il est facile de le vérifier :

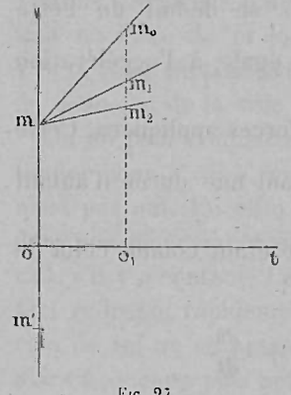



Fig. 27.

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = 950,$$

$$N + M + lF = 3.000 - 2.050 = 950.$$

A partir de ce moment l'accélération due aux forces appliquées est moins grande que celle qui résulterait de la loi exponentielle, il n'y a plus de poussée du rail sur l'essieu accouplé, et le mouvement de la machine est libre.

Pour continuer l'étude de la rotation, nous appliquerons la méthode suivante :

Soit (*fig.* 27) :

$$Om = I \frac{d\theta}{dt}, \qquad Om' = I \frac{d\theta'}{dt}.$$



valeurs proportionnelles aux vitesses angulaires à un moment quelconque. Nous prenons pour le tender la quantité $I \frac{d\theta'}{dt}$, produit de la vitesse angulaire par le moment d'inertie de la locomotive, pour simplifier les calculs et pouvoir comparer plus facilement les vitesses angulaires de la locomotive et du tender.

Le sens de la variation de la vitesse, $I \frac{d\theta}{dt}$, est toujours déterminé, à un instant quelconque, d'après les valeurs de N et M, bien qu'on ne connaisse pas le terme $lF$ qui entre dans la différentielle :

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = N + M + lF.$$

En effet, si ce terme $lF$ n'existait pas dans la différentielle, la vitesse croîtrait comme le représente la ligne $mm_0$, par exemple. L'action du tender, qui se traduit par le terme $lF$, a pour effet de contrarier le mouvement de la locomotive, mais sans en changer le sens, de sorte que $I \frac{d\theta}{dt}$ croît comme l'indique la courbe $mm_1$, du reste inconnue. En considérant un intervalle suffisamment petit, nous pourrons faire une première hypothèse acceptable, à savoir que $mm_1$ est une ligne droite. Nous tracerons donc arbitrairement, à partir du point $m$ et au-dessous de $mm_0$, une droite $mm_1$, que nous supposerons représenter la vitesse $I \frac{d\theta}{dt}$. Le rapport :

$$\frac{O_1 m_1 - Om}{OO_1} = \frac{\Delta I \frac{d\theta}{dt}}{\Delta t}$$

nous donnera l'accélération moyenne $I \frac{d^2\theta}{dt^2}$ et, par suite, F, puisque N et M sont connus.

Nous calculerons ensuite la vitesse angulaire du tender, qui correspond à $I\frac{d\theta}{dt} = O_1 m_1$, en appliquant la relation de condition :

$$V\theta' + l'\frac{d\theta'}{dt} = V\theta - l\frac{d\theta}{dt},$$

dans laquelle le second membre est connu. On peut, par suite, trouver $\frac{d\theta'}{dt}$ et $\theta'$, soit en se servant de l'intégrale de cette différentielle, soit, ce qui est plus simple et plus rapide en pratique, par approximations successives, la valeur de $\theta'$ pour $t = OO_1$ ne différant pas beaucoup de la valeur initiale.

On obtient donc la vitesse angulaire du tender et, par suite, l'accélération, d'où on déduit par application de l'égalité :

$$I'\frac{d^2\theta'}{dt^2} = M' + lF,$$

une seconde valeur de F.

La courbe $mm_1$ sera la vraie courbe de vitesse $I\frac{d\theta}{dt}$, si les valeurs de F obtenues par les deux procédés que nous venons d'indiquer sont égales.

On n'arrive ordinairement à ce résultat que par une série d'approximations auxquelles on procède comme il suit. Après avoir pris pour point de départ une ligne arbitraire $mm_1$, on calcule comme il a été dit l'accélération du tender et la valeur de F qui s'en déduit; on porte cette valeur de F dans la différentielle du second ordre exprimant le mouvement de la locomotive, et on trouve ainsi une deuxième ligne $mm_2$, représentant la vitesse $I\frac{d\theta}{dt}$ d'une façon plus approchée que $mm_1$.

Il est facile de s'assurer que cette méthode d'approximation est rigoureuse.



En l'appliquant à notre exemple, on construit les parties $bc$ et $b'c'$ des courbes $I\theta$ et $I\theta'$ (*fig.* 1, Pl. VI).

On reconnaît que, pour $t = 0'',12$, on a $\zeta' + l'\theta' = \varepsilon$ et que, par suite, le boudin de la roue droite d'avant du tender arrive au contact du rail.

Il est à remarquer que, quand même l'essieu d'avant du tender aurait un jeu, des fusées dans les coussinets, par rapport au bâti, ce jeu est épuisé sur la droite, dans la position du tender actuellement considérée, parce que, à partir de l'instant où le centre de l'essieu d'avant a traversé l'axe de la voie en allant de gauche à droite, le bâti a profité du jeu des fusées, la résistance à vaincre étant pour cela moins grande que pour déplacer l'essieu. Ainsi, lorsque se produit le contact avec le rail, l'essieu d'avant du tender peut être considéré comme solidaire du bâti.

Il y a donc un choc important du tender sur le rail et une réaction latérale du boudin sur le rail, par suite de laquelle le redressement du tender se trouve accéléré.

La réaction des tampons atteint alors sa limite maxima, et la vitesse angulaire de la locomotive se trouve annulée jusqu'à ce qu'on ait $\theta' = o$. On obtient pendant cette période les fractions $cd$ et $c'd'$ des courbes $I\theta$ et $I\theta'$.

Ensuite le tender s'incline, comme la locomotive, de droite à gauche, et le mouvement s'étudie comme il a été expliqué un peu plus haut. La *fig.* 1, Pl. VI, donne les courbes des angles, des vitesses angulaires et des écarts du centre de gravité de la locomotive et du tender.

On reconnaît que, pour $t = 1'',30$, on a : $\theta = o$ à gauche, $\zeta = 9$ millimètres avec $\zeta' = 6^{mm},9$, $I\theta' = 14$ pour le tender. Par conséquent, la locomotive se redresse, et le mouvement est renversé avant que le boudin de la roue gauche d'avant arrive au contact du rail. Il n'y a donc ni choc, ni réactions sur la voie.

On pourrait penser que ce résultat tient aux valeurs initiales admises au début et que nous trouvons être

fausses. Mais il n'en est rien, car, si nous continuons la construction par l'étude du mouvement inverse de gauche à droite, nous retrouvons pour $t = 2'',60$ :

$$0 = 0, \quad \zeta = 10 \text{ millimètres}, \quad I0' = 10, \quad \zeta' = 7^{mm},5.$$

La demi-période d'oscillation est d'environ 1 seconde 30 centièmes.

L'action du tender a donc pour effet de rendre le mouvement de lacet de la machine inoffensif par rapport à la voie.

Mais il faut remarquer que cette conclusion favorable est subordonnée à un certain nombre d'hypothèses que nous allons rappeler et discuter.

1° Nous avons admis que le serrage des tampons restait invariable, et nous n'avons pas ainsi tenu compte de l'élasticité de l'attelage. En réalité, l'effort moteur de la machine transmis à la barre d'attelage par l'intermédiaire du ressort de traction varie, à chaque tour de roue, dans des limites assez étendues (on les étudie comme il a été dit au § II), de sorte que le ressort de traction peut osciller dans certains cas, et la réaction des tampons est sujette à varier.

2° Nous avons admis également que le poids du tender restait constant, tandis que, au contraire, à mesure que la provision d'eau s'épuise, ce poids diminue notablement. Le tender de 25 tonnes en charge complète, pris comme exemple, contient 10 mètres cubes d'eau, sans compter 2 à 3 tonnes de combustible ; son poids varie donc, en réalité, de 25 tonnes à 15 tonnes environ. D'ailleurs, il est évident que plus le poids du tender est faible, moins est efficace son action sur le lacet de la machine.

3° Nous avons admis, enfin, que le coefficient de frottement des tampons l'un sur l'autre était de $\frac{1}{5}$. Nous pensons



que c'est là une limite supérieure. Ce coefficient doit probablement varier de la même façon que le coefficient de frottement des roues sur les rails, ou coefficient d'adhérence. Par suite, il peut s'abaisser à $\frac{1}{10}$ et même à moins, d'autant plus que les surfaces en contact des tampons de la machine et du tender acquièrent plus ou moins de poli, par suite de leur frottement constant, et doivent donc glisser facilement l'une sur l'autre.

L'action du tender sur la machine peut ainsi se trouver considérablement amoindrie.

L'étude que nous en avons faite dans ce paragraphe permet de se rendre compte du coefficient de frottement et du serrage des tampons, qui sont nécessaires pour que l'effet soit tel que nous l'avons indiqué.

La réaction F entre tampons doit toujours être inférieure à la réaction provenant du glissement. Il s'agit donc de déterminer le maximum de F.

Considérons, par exemple, l'intervalle de temps correspondant à la partie *ef* de la courbe I0 (*fig.* 1, Pl. VI). L'angle 0 augmente, N est favorable à la rotation, et la vitesse I $\frac{d0}{dt}$, après avoir augmenté rapidement à partir de l'instant où N est favorable, reste sensiblement constante pendant une certaine durée. Il en résulte qu'on peut regarder l'accélération comme nulle, et qu'on a :

$$N + M - lF = 0.$$

N et M étant connus, on en déduit F.

Plus la force de frottement des tampons s'éloignera du maximum ainsi déterminé, moins le tender exercera d'effet sur le mouvement de rotation de la machine.

Pour la vitesse, I $\frac{d0}{dt}$, considérée, M est ordinairement voisin de zéro. Il ne peut, en tout cas, jamais avoir une

valeur positive importante. Par conséquent, le maximum de $l$F est égal au maximum de N.

En pratique, il suffit que le moment de la force de frottement des tampons soit au moins égal à la moyenne de N. Dans le cas pris comme exemple, il suffit donc qu'on ait : $l\text{F} = 2.500$; d'où : F $=$ 625 kilogrammes. Pour un coefficient de frottement entre tampons de $\frac{1}{5}$, cette valeur de F correspond à un serrage de : $5 \times 625 = 3.125$ kilogrammes, inférieur au serrage de 5.680 kilogrammes que nous avons admis. Pour un coefficient de frottement de $\frac{1}{10}$ qui est, pensons-nous, beaucoup plus près de la réalité que le premier, la valeur limite de F correspond à un serrage de 6.250 kilogrammes, un peu plus grand que le serrage admis. Ainsi, dans ce cas, l'action des tampons n'aurait qu'une efficacité incomplète ; le mouvement de lacet de la machine serait intermédiaire entre les mouvements représentés par les courbes des *fig.* 2, Pl. V, et 1, Pl. VI.

On peut conclure, en résumé, que le serrage des tampons exerce un effet salutaire sur le mouvement de lacet de la locomotive, mais qu'il peut se présenter telles circonstances où ce serrage n'a plus qu'une efficacité restreinte. On aurait donc tort de compter uniquement sur ce moyen pour rendre stables des locomotives qui, comme celle prise comme exemple dans les deux précédents paragraphes, ne le sont pas par elles-mêmes.

## XIX. — Comparaison entre quelques types de locomotives.

J'ai cru devoir entrer dans les longs développements qui précèdent pour bien montrer qu'on peut faire l'étude



complète du mouvement de lacet des locomotives et des conséquences qu'il entraine au point de vue de la stabilité des machines et de la voie. La place nous manque pour étudier en détail d'autres types de locomotives. Du reste, cette tâche revient, à juste titre, aux ingénieurs de la traction qui seront curieux de connaître l'allure réelle de leurs locomotives.

Nous nous bornerons à donner quelques résultats sur la stabilité des trois types de machines représentés par les silhouettes des *fig.* 2, 3 et 4, Pl. VI.

La locomotive de la *fig.* 4 est celle étudiée dans les paragraphes précédents. Nous avons reconnu que cette locomotive peut, dans certaines circonstances, exercer sur la voie, par l'intermédiaire de son premier essieu moteur rigide, placé à une certaine distance en avant du centre de gravité, des chocs et des réactions très considérables. Elle n'a donc pas une stabilité suffisante et cela tient principalement à la position du premier essieu moteur rigide. Plus cet essieu serait reporté vers l'arrière, plus la machine serait stable.

Cette conclusion relative aux machines à essieux moteurs centraux et à essieux porteurs aux extrémités n'est pas neuve; elle a été démontrée pratiquement par les expériences effectuées en 1889 sur l'initiative de la Cie Paris-Lyon-Méditerranée. Elle se trouve expliquée par notre analyse.

L'infériorité de ces machines ne tient pas uniquement, comme on l'a avancé quelquefois, à ce que les cylindres sont extérieurs et placés en porte-à-faux à l'avant du premier essieu ; car cette position des cylindres à l'avant n'a pour effet direct que d'augmenter les oscillations de l'avant de la machine dues aux réactions des têtes de bielle sur les glissières ; or, ces oscillations n'ont qu'une faible importance par rapport à celles dues aux inégalités de la voie.

Le moment N des efforts exercés sur les longerons est

plus grand lorsque les cylindres sont extérieurs que lorsqu'ils sont intérieurs ; aussi l'amplitude de la déviation de la machine est-elle plus grande dans le premier cas que dans le second. Mais l'effet du moment N n'a au fond qu'une influence assez restreinte sur le mouvement de rotation et la disposition des cylindres à l'extérieur ou à l'intérieur des longerons ne modifie pas essentiellement l'allure des machines.

Le but principal à atteindre pour que le mouvement de lacet soit inoffensif est de faire en sorte que la déviation de la machine change de sens avant qu'aucun essieu rigide (ou pouvant se comporter comme tel) arrive au contact du rail. Il y a, à cet effet, quatre mesures à prendre, dont les deux premières sont essentielles. Il faut : 1° reporter le plus possible vers l'arrière les essieux moteurs rigides;

2° Munir le ou les essieux d'avant d'appareils leur permettant de se déplacer transversalement par rapport au bâti, ce déplacement devant être d'ailleurs combattu par un dispositif de rappel ;

3° Augmenter le plus possible l'empattement, dans lequel il faut comprendre les essieux non rigides ;

4° Enfin, accessoirement, placer les cylindres à l'intérieur ou employer 4 cylindres.

Ces conditions se trouvent souvent réunies dans les locomotives à bogie et sont la raison de la supériorité de ces machines.

Par exemple, la locomotive à bogie de la *fig.* 2, Pl. VI, prend un mouvement de lacet d'amplitude presque aussi grande que la locomotive de la *fig.* 11 (en supposant que les moments N sont les mêmes). Mais, si le bâti peut se déplacer transversalement sur le bogie, le mouvement change de sens avant que le premier essieu rigide arrive au contact du rail.

Si le bâti ne peut se déplacer transversalement sur le bogie, il se produit, au moment où le premier essieu du



bogie se trouve arrêté par le rail, des chocs et des réactions. Mais, comme je l'ai fait observer au § XI, les boudins des deux roues d'un même côté du bogie arrivent ordinairement en même temps au contact du rail et, par suite, chocs et réactions se trouvent répartis en deux points du rail. L'effet sur la voie n'en est pas moins très considérable. Aussi faut-il regarder comme indispensable de permettre au bâti un certain déplacement transversal sur le bogie.

La locomotive de la *fig.* 3, Pl. VI, est une machine mixte à 3 essieux accouplés pouvant servir indifféremment à remorquer des trains de marchandises ou des trains de voyageurs de vitesse peu élevée. On a depuis longtemps observé que ces machines mixtes se comportent mal aux vitesses un peu grandes, 60 à 70 kilomètres à l'heure, et elles ont parfois déraillé en pleine voie, même en alignement, sans cause apparente bien déterminée. Si on étudie le lacet de ces locomotives, on reconnaît que, effectivement, leur stabilité laisse beaucoup à désirer, surtout lorsque l'essieu d'avant n'est pas muni de plans inclinés. Dans ce dernier cas, on donne ordinairement aux fusées de l'essieu d'avant un jeu dans les coussinets, pour favoriser l'inscription dans les courbes. Mais ce jeu des fusées ne s'oppose qu'imparfaitement au mouvement de rotation du bâti, en sorte que, lorsque le boudin d'une des roues d'avant arrive au contact du rail, le jeu est épuisé et l'essieu d'avant se comporte comme s'il était rigide. Les chocs et les réactions sur les rails atteignent ainsi leur maximum. La locomotive de la *fig.* 3, supposée sans plans inclinés, exerce des chocs latéraux sur la voie qui équivalent à la chute d'un mouton de 300 kilogrammes tombant de plus de 3 mètres de hauteur. Quant aux réactions statiques, elles atteignent 6 à 7.000 kilogrammes et donnent des composantes verticales parfaitement capables d'amener le déraillement des roues d'avant, si ces roues

sont déchargées par suite des oscillations du bâti, d'ailleurs très importantes.

Ces résultats montrent la nécessité de limiter la vitesse des machines mixtes, de munir l'essieu d'avant de plans inclinés et de graisser les boudins des roues d'avant.

La question de l'accélération des trains express étant, à l'heure actuelle, un peu partout à l'ordre du jour, il importe d'examiner de près les diverses questions qui s'y rattachent, la question de sécurité notamment, qui dépend d'éléments divers, parmi lesquels il faut compter en première ligne la stabilité des locomotives.

Plusieurs ingénieurs ont récemment émis l'avis que la stabilité des machines actuellement employées sur les chemins de fer est suffisante pour ne pas faire obstacle à un accroissement de la vitesse. Dans son discours du 5 juin 1893 à la Société des Ingénieurs civils, M. du Bousquet s'exprimait ainsi :

« Ce qui fait qu'on ne marche pas partout sur nos voies « ferrées à raison de 120 kilomètres à l'heure, ce n'est « pas une question de sécurité, c'est une question de « puissance : la locomotive n'est pas assez forte pour « remorquer à 120 kilomètres à l'heure, ailleurs que sur « les pentes, les charges qu'on lui donne à traîner. »

M. Varennes, dans son mémoire sur l'accroissement de la vitesse des trains express en France (*Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1895) ajoute : « Il y a quarante-deux ans qu'on marche en France à « raison de 120 kilomètres à l'heure ; *jamais* aucun acci- « dent imputable à cette vitesse ne s'est produit. L'expé- « rience est assez longue pour être concluante. »

Malgré ces opinions si autorisées, du reste, un doute ne cesse pas de planer sur la question. D'abord, il n'est



pas bien sûr qu'il ne se soit jamais produit aucun accident imputable à la vitesse. Elle semble, au contraire, n'avoir pas été étrangère à un certain nombre de déraillements en pleine voie. En second lieu, les grandes vitesses n'ont été jusqu'ici réalisées qu'exceptionnellement, sur des portions de voie bien surveillées et qu'on s'est efforcé de consolider le plus possible. Il y a eu entre la locomotive et la voie quelque chose d'analogue à la lutte entre l'obus et la cuirasse. A mesure qu'on a augmenté la vitesse et le poids des machines, éléments desquels dépend principalement l'action dévastatrice exercée par la locomotive sur la voie, on a reconnu la nécessité de renforcer la voie d'une manière parallèle ; et c'est grâce à cette précaution que l'augmentation de la vitesse a pu ne pas compromettre la sécurité. Si donc il n'est pas rigoureux de dire, d'une manière trop générale, que la vitesse n'est pas une cause de danger, cette proposition est pourtant exacte avec cette restriction qu'elle ne doit s'appliquer ou qu'à des voies renforcées, ou qu'à des locomotives parfaitement stables.

Il importe donc beaucoup de pouvoir apprécier le degré de stabilité des machines.

Dans des mémoires antérieurs (*Annales des Mines*, juin 1893 et juillet 1894) et dans celui-ci, je me suis proposé d'étudier la locomotive au double point de vue du moteur et du véhicule, où il faut la considérer. De l'étude de la locomotive en tant que véhicule il résulte qu'on peut assez facilement apprécier le degré de stabilité d'une machine donnée et qu'il existe des machines parfaitement stables, c'est-à-dire n'exerçant aucune action nuisible sur la voie. Pour celles-ci seulement, il est vrai de dire que l'accroissement de la vitesse n'engage pas la question de sécurité, même sur des voies ordinaires.

Il n'y a plus alors à examiner que la question de puissance.

Cette puissance peut être accrue par deux moyens,

soit en augmentant la vaporisation des chaudières, soit en améliorant le rendement du moteur.

Le premier moyen conduit à un accroissement simultané de la puissance et du poids, d'où il résulte que la puissance par unité de poids ne change pas sensiblement. Cela ne résout donc pas le problème, car ce qu'il faut obtenir c'est une augmentation de la puissance pour un poids invariable.

Quant à l'amélioration du moteur, la recherche du rendement exact des machines montre quelle est la limite qu'on ne pourra pas dépasser avec la locomotive à vapeur. Cette recherche conduit, en effet, à apprécier les causes de perte de rendement et jusqu'à quel point on peut y remédier. Il est facile de démontrer que, par rapport aux locomotives ordinaires à simple expansion et à distribution par tiroir, le maximum d'économie qu'on puisse faire est d'environ un tiers. Ce résultat n'a pas été encore obtenu, il est vrai; mais il peut l'être sans grande difficulté par des moyens dont la plupart ont déjà reçu la sanction de l'expérience. Cette économie d'un tiers sur la vapeur dépensée permettra d'accroître d'autant le travail produit. On voit ainsi apparaître la possibilité de réaliser, avec les charges actuelles des trains, des vitesses moyennes de marche variant entre 100 et 120 kilomètres à l'heure. La locomotive à vapeur ne permettra jamais d'aller au-delà, et il en est de même d'ailleurs de tout système de moteur qui devra se transporter avec son train. La traction par l'électricité, au moyen de conducteurs électriques placés le long des voies, est seule capable, si elle peut jamais être appliquée, de reculer ces limites.

Bourges, 8 février 1896.



# TABLE DES MATIÈRES.

Pages (*).

INTRODUCTION ..... 413

PREMIÈRE PARTIE.

OSCILLATIONS D'UNE LOCOMOTIVE SUR LES RESSORTS.

I. — Équations générales des oscillations d'un véhicule porté par des ressorts ..... 415
II. — Équations de condition ..... 419
III. — Intégration des équations ..... 423
IV. — Étude de la courbe formée par les rails sous les roues d'une locomotive ..... 427
V. — Réactions de la crosse du piston sur les glissières ..... 429
VI. — Oscillations propres des ressorts ..... 431
VII. — Influence des dénivellations de la voie sur les oscillations des ressorts ..... 434
VIII. — Loi de périodicité des oscillations ..... 438
IX. — Amplitude des oscillations ..... 445
X. — Oscillations dues aux réactions de la crosse du piston sur les glissières ..... 454
XI. — Influence de la différence de flexibilité des ressorts ..... 457
XII. — Cas d'une locomotive à quatre essieux ..... 461
XIII. — Cas d'une machine à bogie ..... 462

DEUXIÈME PARTIE.

MOUVEMENT DE LACET.

CHAPITRE PREMIER.

Mouvement de lacet d'une locomotive. — Forces appliquées.

Pages (**).

I. — Considérations sur les mouvements parasites. Leur définition ..... 232

(*) Tome IX, 1er semestre 1896.
(**) Tome X, 2e semestre 1896.

Pages.

II. — Étude des forces provenant de l'action de la vapeur et de celle des pièces en mouvement relatif. Locomotives à cylindres extérieurs ..... 235
III. — Locomotives à cylindres intérieurs ..... 245
IV. — Locomotives compound à quatre cylindres ..... 246
V. — Frottements des roues sur les rails dans les mouvements latéraux d'une locomotive ..... 250

CHAPITRE II.

**Mouvement de lacet en alignement et en courbe.**

VI. — Résolution de l'équation générale du mouvement de lacet ..... 258
VII. — Contact des mentonnets avec les rails. Chocs sur les rails ..... 265
VIII. — Équation du mouvement pendant le contact des mentonnets avec les rails ..... 268
IX. — Réactions des mentonnets sur les rails ..... 272
X. — Influence des jeux des essieux ..... 277
XI. — Machines munies d'essieux convergents ou de bogies .. 282
XII. — Circulation en courbe ..... 291
XIII. — Mouvement de lacet en courbe ..... 299
XIV. — Action du tender et du train sur le mouvement de la locomotive ..... 308
XV. — Circulation des locomotives munies d'attelages convergents dans les courbes ..... 315
XVI. — Etude cinématique des attelages convergents ..... 327

CHAPITRE III.

**Application de l'étude du mouvement de lacet à une locomotive à voyageurs, à deux essieux accouplés et à deux essieux porteurs placés l'un à l'avant, l'autre à l'arrière.**

XVII. — Machine seule ..... 335
XVIII. — Influence du tender sur le mouvement de lacet ..... 349
XIX. — Comparaison entre quelques types de locomotives .... 358



# SUR UN MODE PARTICULIER D'AVARIES

## LE LONG

# DES RIVURES DE CHAUDIÈRES

Par M. C. WALCKENAER, Ingénieur des Mines,
Secrétaire de la Commission centrale des machines à vapeur.

Le long d'une rivure (*), la ligne théorique de moindre résistance passe par les trous de rivets. Cependant, à la suite de plusieurs accidents où des bouilleurs de chaudières se sont ouverts le long de leurs rivures longitudinales, on a constaté que la déchirure, dans sa partie initiale et caractéristique, avait affecté l'une des tôles non suivant cette ligne, mais suivant une ligne parallèle, entre les trous de rivets et la ligne d'appui du matage de l'autre tôle (*fig.* 1).

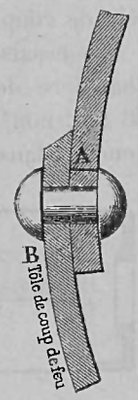


Fig. 1.

*Rappel de l'explosion de Roubaix.* — Une note sur un cas de ce genre a été publiée par M. Olry, en 1885 (**): il s'agissait d'une chaudière installée dans une filature de Roubaix. L'accident a con-

(*) On n'aura à considérer ici que des assemblages à recouvrement et à rivure simple.

(**) *Annales des Mines*, 8e série, t. VIII, p. 476 et suiv.

sisté dans la déchirure de la tôle supérieure du bouilleur de droite, le long de la rivure longitudinale de gauche, sur 1$^{m}$,20 de longueur. Ce bouilleur avait 70 centimètres de diamètre ; il était construit en tôle de 10$^{mm}$,5. Sur les lèvres de la plaie, le métal présentait partout une teinte noire indiquant l'existence d'anciennes cassures. En faisant dériver l'assemblage avec soin dans la partie non affectée par l'arrachement, M. Ohry a reconnu que cette tôle était fissurée sur presque toute la longueur de l'assemblage ; seulement la fissure ne régnait, dans la partie non arrachée, que sur une fraction de l'épaisseur du métal ; elle existait du côté extérieur de la tôle, qui était la tôle intérieure de l'assemblage, de sorte que l'amorce de fissure se trouvait masquée par le recouvrement de la tôle de coup de feu (*fig.* 2).



Fig. 2.

Les essais de traction ont montré, dans le cas de cette chaudière de Roubaix, une tôle de bonne ductilité : 36 kg : mm$^{2}$ de résistance et plus de 13 p. 100 d'allongement dans le sens principal du laminage, 34 kg : mm$^{2}$

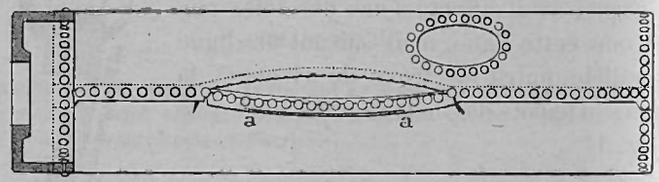



Fig. 3.

et 11 p. 100 d'allongement dans le sens transversal ; seulement la chaudière, construite en 1876, l'avait été par un chaudronnier qui ne possédait pas de four à chauffer les tôles et qui avait fait le cintrage soit à froid, soit à la forge, ce qui avait dû favoriser la formation de criques ; puis, une fuite à cette rivure s'étant manifestée quelques



mois avant l'explosion, on avait cherché à y remédier par un matage sur les rivets et le long d'un chanfrein pratiqué à cet effet en *aa* (*fig.* 3) sur 70 centimètres de développement ; cette opération avait dû être renouvelée à plusieurs reprises. La rupture s'est produite sur l'étendue correspondant au chanfrein, et un peu au-delà des deux côtés.

*Sommaire des explosions de Boulogne-sur-Seine et de Quincy.* — Deux violentes explosions de chaudières à bouilleurs, provoquées par des avaries du même genre, l'une le 26 janvier 1894 dans un lavoir, à Boulogne (Seine), l'autre, le 7 décembre 1895, dans une fabrique de plâtre, à Quincy (Seine-et-Marne), ont présenté des caractères qu'il paraît instructif de comparer aux précédents et de rapprocher entre eux.

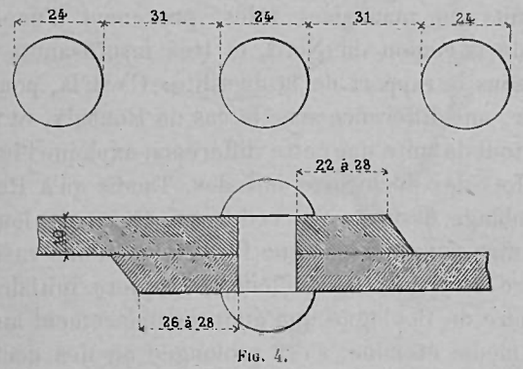



Fig. 4.

La chaudière du lavoir de Boulogne, offrant 16 mètres carrés de surface de chauffe, 5$^{m3}$,8 de capacité, timbrée à 6 kilogrammes, avait des bouilleurs de 60 centimètres de diamètre, en tôles de 10 millimètres, dont les rivures longitudinales étaient constituées comme l'indique la *fig.* 4. A la fabrique de plâtre de Quincy, la surface de chauffe était 25 mètres carrés ; la capacité, 5$^{m3}$,8, comme à Bou-

logne; le timbre, 7 kilogrammes; les bouilleurs, de 60 centimètres de diamètre également, en tôles de 8 ou 9 millimètres d'épaisseur, avaient leurs rivures longitudinales comme *fig.* 5.

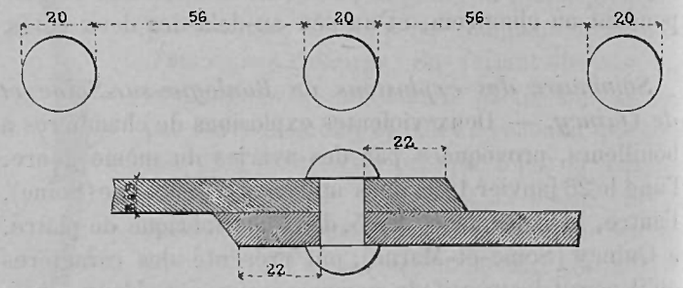



Fig. 5.

Dans l'un et l'autre cas, les générateurs avaient été construits en mauvaises tôles, provenant d'une même usine de la région du Nord, et très insuffisantes notamment sous le rapport de la ductilité. C'est là, pour commencer, une différence avec le cas de Roubaix, et remarquons tout de suite que cette différence explique l'inégalité des effets des déchirures initiales. Tandis qu'à Roubaix, l'assemblage fissuré a pu céder sur 1$^{m}$,20 de longueur, sans autre conséquence que l'ouverture d'une vaste boutonnière au flanc du bouilleur, la rupture initiale de la chaudière de Boulogne, qui était d'emplacement analogue et de même étendue, s'est prolongée en des déchirures consécutives, à la faveur desquelles la virole antérieure du bouilleur s'est déroulée complètement (*fig.* 6), en se trouant par le choc, ainsi que le montrent les *fig.* 6 et 9, contre un chandelier qui la soutenait; la tête en fonte a été projetée; la chaudière a bondi en l'air; le bâtiment qui contenait l'installation s'est effondré, ensevelissant sous ses décombres ceux qui s'y trouvaient. Trois personnes ont été tuées, quatre ont subi de graves



blessures. La *fig.* 7 donne une idée partielle de l'état des lieux après le déblaiement.

A Quincy, les effets dynamiques ont peut-être été plus violents encore : le bouilleur de droite, siège de l'avarie

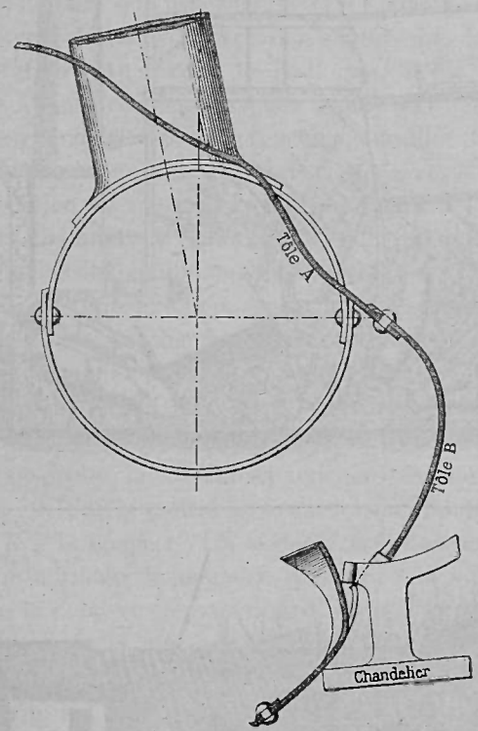



Fig. 6.

initiale, se déchira en plusieurs lambeaux qui furent diversement projetés; le corps de chaudière, déroulé entièrement sur la longueur de sa virole d'arrière, privé du fond correspondant et séparé de ses bouilleurs, fut lancé à 88 mètres de distance; divers fragments et les appareils de sûreté furent dispersés au loin; le bâtiment qui conte-

nait le générateur fut démoli (*fig.* 8). Comme accidents de

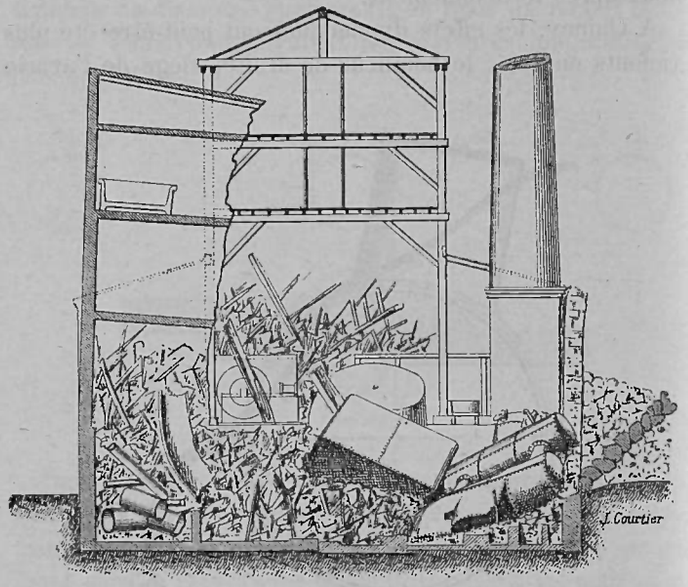



Fig. 7.

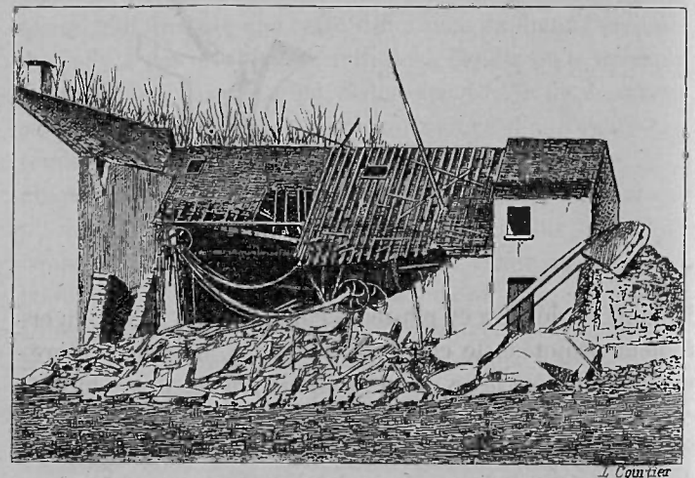



Fig. 8.



personnes, il n'y eut que trois blessés, dont un seul grièvement, parce que l'usine, isolée, était à peu près déserte.

*Causes de ces explosions.* — Ni à Boulogne, ni à Quincy, pas plus d'ailleurs que précédemment à Roubaix, l'enquête n'a découvert de cause d'explosion ailleurs que dans l'état du générateur. Au lavoir de Boulogne, il est vrai, les machines étaient restées stoppées depuis une heure environ, et la chaudière n'avait à fournir qu'un filet de vapeur sur une bâche à eau chaude; mais rien n'autorise à croire que la pression ait dépassé le timbre. Quant à l'usine de Quincy, la chaudière y était, semble-t-il, dans des conditions normales de fonctionnement modéré, à 1 kilogramme au-dessous du timbre, lorsqu'est survenu l'accident.

Mais la cause de chacune de ces explosions apparaissait à l'examen des cassures. La déchirure longitudinale suivant laquelle s'était ouverte la chaudière de Boulogne, le long de la rivure de gauche de la virole antérieure du bouilleur de droite, montrait les particularités représentées par la *fig.* 9. Sur la moitié environ de son étendue, de la coupe n° 7 à la coupe n° 13, la déchirure était en dehors de la ligne normale de moindre résistance et affectait la tôle A de la demi-virole supérieure, ou tôle intérieure de l'assemblage, de la même manière qu'à Roubaix. L'examen des lèvres de cette déchirure anormale, avant et après lavage à l'acide, montra des vestiges d'altérations préexistantes, placées surtout, de même qu'à Roubaix, le long de la face extérieure de la tôle, et intéressant, suivant les endroits, une fraction plus ou moins grande de son épaisseur. On a essayé de marquer sur la *fig.* 9 la valeur approximative de ces vestiges (*) au moyen de fractions inscrites le long du dessin de la cassure et indi-

(*) Les relevés relatifs à la chaudière de Boulogne ont été faits, avec beaucoup de soin, par M. le contrôleur des Mines Mahl.

quant la portion de l'épaisseur affectée par l'altération en divers points.

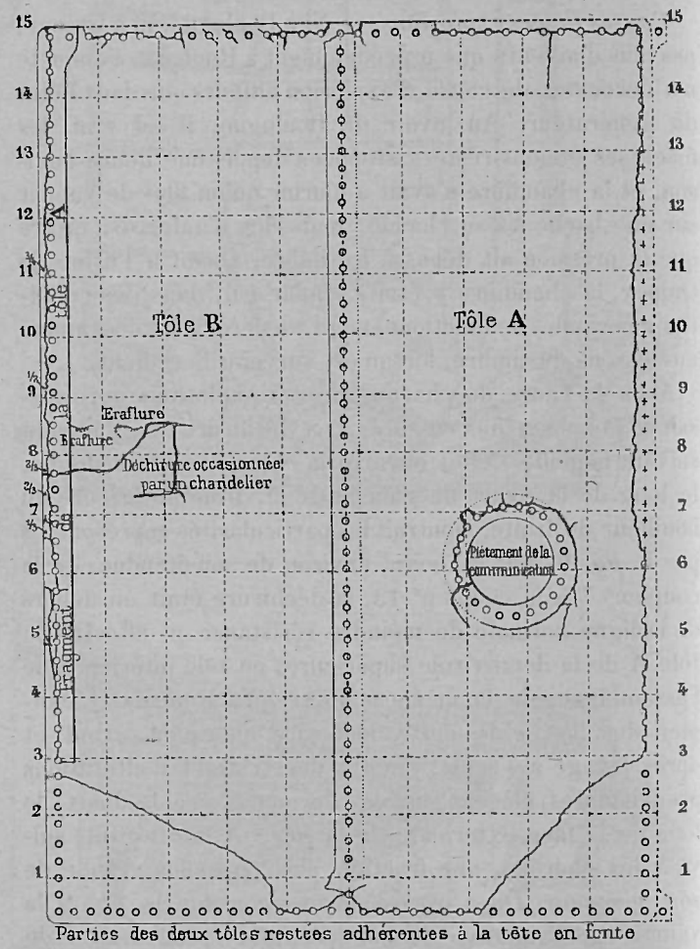



FIG. 9.

A Quincy, l'avarie du même genre qui a amorcé l'explosion se trouvait également à la tôle supérieure de



la virole d'avant du bouilleur de droite; elle était seulement à la rivure de droite au lieu de celle de gauche. La *fig.* 10 en rend compte (*). Elle avait, elle aussi,

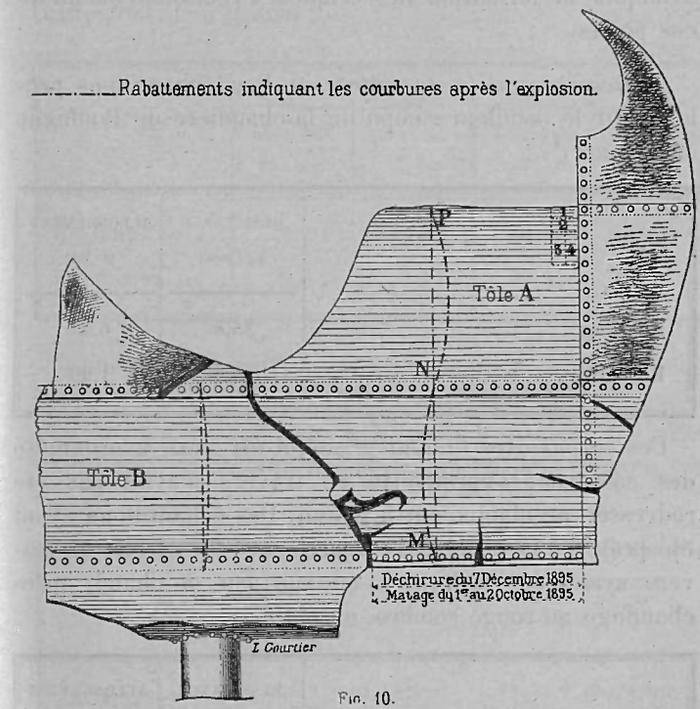



FIG. 10.

1m,20 de longueur. M. Janet y a constaté des indices de cassure préexistante.

Dans ce cas de Quincy, l'origine des fissures a pu tenir, comme à Roubaix, aux conditions du cintrage, opéré sur des tôles chauffées par des procédés imparfaits, dans un atelier ne possédant pas de four pour cet usage. Pour Boulogne, le cintrage avait été, semble-t-il, opéré par

(*) Les données relatives à l'explosion de Quincy sont empruntées au rapport de M. l'ingénieur des Mines Janet.

des procédés convenables; mais la tôle était de mauvaise qualité, et les efforts qu'elle a subis, notamment la réaction des matages opérés sur la tôle adjacente, suffisent à expliquer la formation des criques. Précisons chacun de ces points.

*Mauvaise qualité des tôles.* — Des échantillons prélevés sur le bouilleur rompu de la chaudière de Boulogne ont donné (*) :

| | RÉSISTANCE kg : mm² | ALLONGEMENT p. 100 |
|---|---|---|
| En long | 35,8 | 6,50 |
| En travers | 26,0 | 1,99 |

Ces éprouvettes étaient prises, il est vrai, à proximité des cassures; l'éprouvette en travers n'avait pas été redressée préalablement à l'essai. Des échantillons ayant été prélevés à l'écart des cassures, et l'éprouvette en travers ayant été redressée au marteau, à chaud, après chauffage au rouge sombre, on obtint :

| | RÉSISTANCE kg : mm² | ALLONGEMENT p. 100 |
|---|---|---|
| En long | 35,3 | 9,85 |
| En travers | 36,2 | 2,33 |

(*) Toutes les constatations relatives aux propriétés mécaniques des tôles de la chaudière de Boulogne ont été faites, en ma présence, à l'atelier des essais de la Cie des Chemins de fer P.-L.-M., grâce à la précieuse obligeance de M. Baudry, Ingénieur en chef du Matériel et de la Traction, de M. Vanderheym, Ingénieur, de M. Ledoux et du personnel de l'atelier des essais.



En opérant comparativement sur de nouvelles éprouvettes prises côte à côte, mais les unes recuites au rouge vif et refroidies lentement, les autres n'ayant pas subi ce traitement, l'on trouva :

| | TÔLE NON RECUITE | | TÔLE RECUITE | |
|---|---|---|---|---|
| | RÉSISTANCE kg : mm² | ALLONGEMENT p. 100 | RÉSISTANCE kg : mm² | ALLONGEMENT p. 100 |
| En long | 36,2 | 11,30 | 34,3 | 16,85 |
| En travers | 30,8 | 1,17 | 23,8 | 2,66 |

Enfin, des échantillons prélevés, non sur la tôle du bouilleur rompu, mais sur la tôle symétrique du bouilleur de gauche, qui n'avait pas subi, comme l'autre, les effets mécaniques résultant du déroulement de la virole, ont donné :

| | RÉSISTANCE kg : mm² | | ALLONGEMENT p. 100 | |
|---|---|---|---|---|
| En large | 34,8<br>36,2 | moyenne<br>35,5 | 11,33<br>14,66 | moyenne<br>13,00 |
| En travers | 30,2<br>29,9 | moyenne<br>30,1 | 1,66<br>1,13 | moyenne<br>1,40 |

On voit combien l'allongement en travers reste mauvais, quelles que soient la place de l'échantillon et la préparation de l'éprouvette ; un long recuit au rouge vif, suivi d'un refroidissement très lent, n'est parvenu à en élever la valeur qu'à 2,66 p. 100.

Aux essais de ployage, cette tôle a donné de détes-

tables résultats. Pour chacun de ces essais, une barrette de 25 centimètres de longueur, 5 centimètres de largeur, et naturellement 1 centimètre d'épaisseur (épaisseur de la tôle), était posée sur deux appuis distants de 115 millimètres; puis, un dégorgeoir étant posé au milieu, l'on frappait le dégorgeoir au marteau. Les coups étaient répétés jusqu'à ce que la tôle présentât une crique occupant toute la largeur de l'éprouvette; toutefois, pour l'éprouvette taillée en long dont le métal avait été recuit, le ployage, qui n'a pas abouti à criquer la tôle, a été achevé en frappant directement une des extrémités de la barrette, appuyée par l'autre extrémité sur l'enclume. La *fig.* 11 permet de juger des résultats obtenus : elle représente, en vraie grandeur, la courbure prise par chaque éprouvette lorsqu'elle s'est ou rompue, ou trouvée criquée de la manière qui est inscrite sur la courbe correspondante. Chaque courbe a été obtenue en faisant glisser un crayon le long de l'éprouvette déformée. On remarquera combien ce mode d'essai a bien mis en relief les différences résultant du sens et du mode de préparation des éprouvettes, et combien les éprouvettes découpées en travers et non recuites se sont montrées incapables de flexions notables.

Les divers résultats qui précèdent sont, d'ailleurs, en harmonie avec la composition chimique de la tôle, où le Laboratoire de l'École supérieure des Mines a dosé, p. 100:

| | |
|---|---|
| Phosphore | 0,3126 |
| Silicium | 0,0740 |
| Manganèse | 0,0730 |
| Soufre | 0,0480 |

C'était, en résumé, une tôle phosphoreuse, à propriétés mécaniques très inégales dans les deux sens, et manquant presque totalement, dans le sens transversal, de ductilité et de flexibilité. Elle avait, d'ailleurs, été achetée à bas prix par le constructeur.



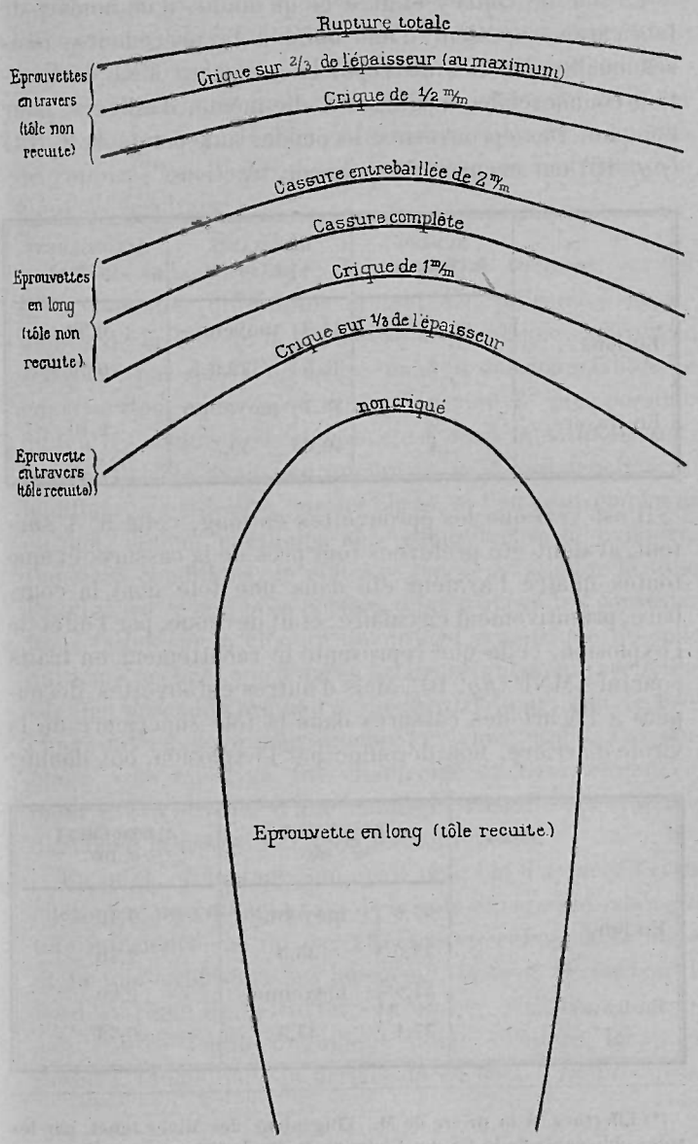



Fig. 11.

La tôle de Quincy était, à ce qu'on dit, d'un numéro de fabrication supérieur d'une unité à la précédente; mais ses qualités réelles ne répondaient guère à sa désignation commerciale, insuffisante elle-même, d'ailleurs, pour l'emploi. Des éprouvettes découpées aux points 1, 2, 3, 4 (*fig.* 10) ont accusé aux essais de traction (*) :

| | NUMÉRO de l'Éprouvette | RÉSISTANCE kg : mm² | | ALLONGEMENT p. 100 |
|---|---|---|---|---|
| En long..... | 1 | 34,3 | moyenne | 0,39 |
| | 2 | 34,5 | 32,9 | 0,79 |
| En travers... | 3 | 38,7 | moyenne | 2,40 |
| | 4 | 40,2 | 39,5 | |

Il est vrai que les éprouvettes en long, celle n° 1 surtout, avaient été prélevées tout près de la cassure, et que toutes quatre l'avaient été dans une tôle dont la courbure, primitivement circulaire, était devenue, par l'effet de l'explosion, celle que représente le rabattement en traits ponctués MNP (*fig.* 10). Mais d'autres éprouvettes, découpées à l'écart des cassures dans la tôle supérieure de la virole d'arrière, non déroulée par l'explosion, ont donné :

| | RÉSISTANCE kg : mm² | | ALLONGEMENT p. 100 |
|---|---|---|---|
| En long..... | 37,6 | moyenne | 7,10 |
| | 33,0 | 35,3 | 2,40 |
| En travers..... | 37,9 | moyenne | 2,80 |
| | 37,1 | 37,5 | 0,79 |

(*) Effectués, à la prière de M. l'Ingénieur des Mines Janet, par les soins obligeants de la Cie des Chemins de fer de l'Ouest.



On remarque, non seulement les faibles valeurs, mais l'irrégularité des allongements. « Avant même toute mesure d'allongement (*), l'aigreur de la tôle se manifestait par le mode de rupture des éprouvettes, qui cédaient brusquement sous l'effort, sans contraction de la section de rupture. Les essais de pliage ont également donné de mauvais résultats. »

*Efforts subis; matage; formation de criques.* — On a vu combien différentes étaient les propriétés mécaniques de la tôle de la chaudière de Boulogne, suivant le sens. Or, par suite d'un usage tenant à des commodités de construction, ainsi qu'au désir d'écarter le plus possible du feu les clouures circulaires, c'est *dans le mauvais sens* que cette tôle avait été employée à la construction du bouilleur, c'est-à-dire que les fibres, si l'on peut employer ce mot, étaient parallèles aux génératrices du cylindre. Dans ces conditions, le cintrage put déjà fatiguer la tôle. Puis, il est à peu près certain, tant d'après les constatations faites sur la clouure de droite, symétrique de celle qui nous occupe, que d'après les renseignements recueillis sur les procédés ordinaires du constructeur, que le brochage fut employé pour ajuster la rivure. Enfin, l'assemblage, une fois rivé, fut chanfreiné et maté, exclusivement à l'extérieur, d'une manière vicieuse et capable d'amener la fissuration de la tôle intérieure.

En effet, ce matage, qui avait pour but d'assurer l'étanchéité par un contact exact de la tôle extérieure contre la tôle intérieure, ne fut pas effectué en refoulant le métal de la tôle extérieure sur lui-même, mais en recourbant le bord extrême de cette tôle en un bec saillant, qui pressait l'autre feuille métallique d'une manière locale et intense, tandis que, en arrière de ce bec, il se produisait

(*) Extrait du rapport de M. Janet.

un bâillement entre les deux tôles. La *fig.* 12 indique la disposition prise ainsi par l'assemblage ; ce croquis est double, parce qu'on a voulu représenter les deux rivures droite et gauche du bouilleur, auxquelles on a supposé une même constitution (*). On remarquera que la facette

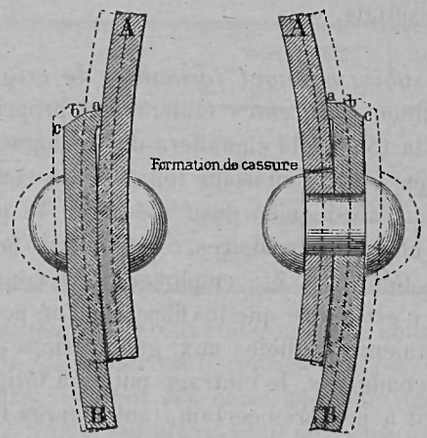



Fig. 12.

*ab* est oblique, par rapport à la surface de la tôle A, de sorte que l'application du matoir le long de cette facette avait eu pour conséquence de *repousser* fortement la tôle A et de la forcer à reculer, pour ainsi dire, de toute la quantité correspondant à l'emplacement du *bec* et du *bâillement*. Repoussée ainsi le long de la

(*) On voit sur chacune des deux moitiés de ce croquis un tracé pointillé, dont la signification est la suivante. D'après l'ensemble des constatations faites sur la chaudière avariée, il y a lieu de présumer que le bouilleur n'était pas rigoureusement circulaire, mais que son diamètre vertical était plus grand que son diamètre horizontal. Sur un dessin d'ensemble où toute la section du bouilleur serait représentée, les traits pointillés correspondraient à une forme régulièrement circulaire de la pièce ; et le dessin montre, à une échelle approximative, de combien devait se trouver réduit, par rapport à cette forme circulaire, le diamètre horizontal.



ligne *a*, maintenue, d'autre part, par la rivure comme par un encastrement, la tôle A ne pouvait que tendre à se fissurer comme le montre le croquis de la rivure de droite.

On s'explique donc aisément que des criques se soient amorcées là dès la construction. Elles se sont ensuite aggravées peu à peu, par l'effet des flexions auxquelles est sujet le voisinage des rivures, et par celui des contractions et des dilatations inégales. Il est à remarquer que, de toutes les parties d'une chaudière à bouilleurs, c'est l'avant des bouilleurs qui voit le plus directement le feu, qui subit les températures les plus élevées ; il est spécialement exposé aux alternatives tantôt de chauffage intense, tantôt de refroidissement par les bouffées d'air qui s'engouffrent dans le foyer lors des chargements ; actions capables de fatiguer d'autant plus les rivures longitudinales que la demi-virole inférieure est plus énergiquement chauffée et se dilate plus que l'autre, comme l'indiquent ces mouvements bien connus des têtes de bouilleurs, qui s'abaissent quand le générateur est mis en chômage et se relèvent à la mise en feu.

Il est donc naturel que des amorces de criques, dues tout d'abord à des causes qui ne sont pas exclusivement spéciales aux viroles antérieures des bouilleurs, se développent particulièrement le long des rivures de ces viroles ; d'où l'uniformité d'emplacement des avaries que nous étudions.

A Boulogne, ce développement des criques a été lent, et la chaudière a sauté huit ans après sa mise en service, sans qu'aucune circonstance spéciale paraisse avoir hâté le dénouement, ni qu'aucune fente préalable ait donné l'alarme.

Il en a été autrement à Quincy. La chaudière n'avait guère que trois ans d'âge. Dès septembre 1894, deux ans après sa mise en service, une première cassure s'était révélée, non au bouilleur qui devait plus tard causer l'acci-

dent, mais à celui de gauche, le long de sa rivure de droite, et comme toujours à la virole d'avant. On avait réparé cette avarie par la pose d'une pièce rivée, en forme de bande longitudinale de 1m,20 de longueur et 0m,17 de largeur. Puis, en septembre 1895, à la rivure de droite du bouilleur de droite, là où bientôt la déchirure en grand devait se produire, une fuite se manifesta. Un ouvrier, envoyé par le constructeur, examina la partie fuyante, crut à un simple desserrage des tôles, et effectua un matage, toujours sur une longueur de 1m,20, le 2 octobre 1895. C'était deux mois avant l'explosion.

Ce matage, loin d'être un remède, contribua sans doute à augmenter l'avarie. La fuite, au lieu de cesser, s'aggrava ; une correspondance fut échangée entre l'usinier et le constructeur à qui ne payerait pas la réparation à faire; finalement, le chauffeur ayant représenté à son patron que des mesures sérieuses s'imposaient, il fut décidé, le 7 décembre au matin, qu'on arrêterait la chaudière le soir ; mais elle fit explosion dans la matinée.

M. Janet, dans l'enquête qui a suivi l'accident, a constaté que le bord de la tôle extérieure avait été à tel point recourbé par le matage qu'il présentait un bec de près de 3 millimètres de saillie.

*Autres cas d'avaries analogues.* — Un autre exemple de fissure en dehors des rivets, le long d'une clouure longitudinale, est fourni par une explosion survenue, le 2 mars 1894, dans une usine du Pouzin. La chaudière était du type à flammes renversées ; c'est le corps inférieur, de 1m,20 de diamètre, construit en tôle de 8 millimètres d'épaisseur primitive (timbre: 2kg,5), qui s'est fragmenté suivant diverses lignes. D'après l'allure générale du déroulement qu'il a subi, on est conduit à placer la déchirure initiale le long de la clouure longitudinale de gauche d'une des viroles de la partie postérieure. Là se trouvait une



cassure dont la *fig.* 13 indique l'emplacement, analogue à celui des avaries précédemment étudiées. Il y avait eu à l'évidence une fissure ancienne, longue de 38 à 40 centimètres ; une mince couche de tartre dur et translucide tapissait en cet endroit la tranche du métal sur toute son épaisseur.

Ce qui différencie notablement ce cas d'avec ceux précédemment étudiés, c'est que l'avarie ancienne est restée de peu d'étendue, et qu'il n'y a eu d'accident qu'au bout d'un temps très long, par le concours de causes multiples et importantes de fatigue. La chaudière, quand elle a sauté, n'avait pas moins de trente ans d'âge. Le corps inférieur avait dû souffrir d'être mal soutenu par les chandeliers placés au-dessous de lui; il était ovalisé de 85 millimètres ; de plus, il était corrodé en plusieurs points ; ses nettoyages avaient laissé à désirer. Les tôles de ce vieil appareil étaient aigres, autant qu'on en peut juger par les essais de traction qui ont été faits sur ses débris déformés.

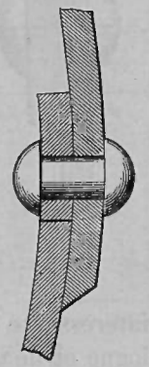


Fig. 13.

Dans une explosion survenue, en 1894, à Bayonne, on trouve encore une déchirure produite dans le recouvrement d'une rivure longitudinale de bouilleur, en dehors des trous de rivets, mais, cette fois, dans la tôle extérieure de l'assemblage; de sorte que la question se présente dans des conditions différentes; les effets de surchauffe ont pu jouer le rôle essentiel, d'autant plus que l'eau d'alimentation donnait lieu à des dépôts très abondants.

Mais un cas particulièrement utile à citer en terminant ces comparaisons est celui d'une batterie de chaudières qui avait été installée vers 1888, dans une usine de Pantin. Ces chaudières avaient été faites en tôles

peu ductiles, supportant mal les efforts de flexion. A peine étaient-elles en service qu'elles donnèrent lieu à une succession d'incidents, par suite de fuites aux rivures longitudinales de leurs bouilleurs, qui durent, à la fin, être entièrement refaits. Le croquis *fig.* 14 représente une coupe prise en travers d'une de ces rivures avariées (*). Les matages successifs, opérés pour étancher les fuites le long du chanfrein, avaient produit entre les tôles, dans le recouvrement, un bâillement de 2 millimètres, et déterminé une cassure dont l'emplacement ne diffère pas beaucoup de celui des avaries étudiées plus haut, et qui paraît s'expliquer si exactement par les mêmes causes qu'on y verra, sans doute, une confirmation intéressante de l'explication donnée des accidents de Boulogne et de Quincy.

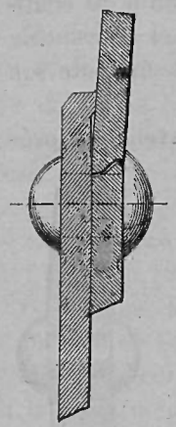


FIG. 14.

(*) Croquis communiqué par M. Compère, ingénieur directeur de l'Association parisienne des propriétaires d'appareils à vapeur.



# BULLETIN

## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DES ÉTATS-UNIS EN 1894 (*) ET EN 1895.

| | 1894 | | 1895 | |
|---|---|---|---|---|
| | Poids | Valeur | Poids | Valeur |
| 1° *Métaux.* | tonn. métr. | francs | tonn. métr. | francs |
| Fonte | 6.764.572 | 372.785.765 | 9.597.449 | 562.716.568 |
| Cuivre | 160.392 | 173.739.733 | 175.294 | 191.375.038 |
| Plomb | 145.906 | 54.830.549 | 142.298 | 52.487.738 |
| Zinc | 67.135 | 26.987.189 | 74.245 | 30.784.170 |
| Mercure | 1.056 | 5.676.451 | 1.179 | 6.804.391 |
| Aluminium | 371 | 2.541.100 | 408 | 2.564.100 |
| Antimoine | 205 | 203.056 | 393 | 356.628 |
| Argent (en kilogrammes) | 1.550.387kg | 162.670.291 | 1.441.087kg | 156.717.253 |
| Or (idem) | 59.824 | 205.963.042 | 70.470 | 242.580.436 |
| Platine (idem) | 3 | 6.216 | 4,5 | 11.655 |
| Total | ..... | 1.005.403.392 | ..... | 1.246.397.977 |
| 2° *Matières minérales.* | tonn. métr. | francs | tonn. métr. | francs |
| Charbon. Anthracite | 47.183.345 | 418.955.813 | 52.965.538 | 465.934.261 |
| Charbon. Houille bitumineuse | 106.813.171 | 537.471.449 | 126.627.141 | 649.283.205 |
| Coke | 7.706.846 | 65.550.610 | 9.006.090 | 79.041.283 |
| Asphalte | 4.080 | 391.888 | 12.970 | 1.554.000 |
| Roches bitumineuses | 31.018 | 767.262 | 39.707 | 743.102 |
| Pétrole brut | 6.158.119 | 211.152.143 | 6.420.742 | 220.397.091 |
| Gaz naturel | » | 67.340.000 | » | 62.160.000 |
| Graphite | 499 | 186.174 | 1.176 | 115.721 |
| Minerai de fer | 12.070.080 | 107.692.200 | 17.221.200 | 153.651.750 |
| Pyrites | 109.192 | 2.416.294 | 82.296 | 1.829.369 |
| Fer chromé | 2.697 | 181.948 | 1.473 | 86.998 |
| Minerai de manganèse | 11.924 | 387.930 | 15.121 | 476.788 |
| Minerai d'antimoine | 150 | 47.008 | 982 | 196.348 |
| Oxyde de cobalt | 3 | 45.807 | 3 | 44.755 |
| Bauxite | 10.908 | 222.367 | 14.371 | 293.084 |
| Monazite | 340 | 233.100 | 862 | 590.520 |
| Pierre à bâtir | » | 155.400.000 | » | 170.940.000 |
| Marne | 228.622 | 3.146.850 | 221.183 | 3.044.752 |
| Castine | 3.601.458 | 11.015.975 | 3.444.240 | 13.170.196 |
| Marbre | 518.532 | 18.528.099 | 568.593 | 21.166.832 |
| *A reporter* | ..... | 1.601.132.417 | ..... | 1.844.716.392 |

(*) Les chiffres de 1894, bien que déjà publiés l'an dernier (*Ann. des Mines*, 2e vol. de 1895, p. 232-233), sont donnés de nouveau ici à raison des rectifications apportées à un certain nombre d'entre eux.

| | 1894 | | 1895 | |
|---|---|---|---|---|
| | Poids | Valeur | Poids | Valeur |
| | tonn. métr. | francs | tonn. métr. | francs |
| *Report* | ..... | 1.601.132.417 | ..... | 1.844.716.392 |
| Chaux | 5.148.320 | 146.982.500 | 5.443.164 | 155.400.000 |
| Ciment | 1.175.174 | 29.346.637 | 1.182.885 | 31.221.797 |
| Pierre meulière | 27.200 | 1.334.347 | 33.004 | 1.504.158 |
| Pierres à meules | » | 23.035 | » | 44.160 |
| Pierres à aiguiser | 1.574 | 437.451 | 1.459 | 405.610 |
| Silice, sable et quartz | 485.313 | 2.168.410 | 532.018 | 2.865.203 |
| Tripoli | 1.508 | 118.233 | 1.622 | 134.934 |
| Argile réfractaire | 3.061.794 | 20.983.584 | 3.401.250 | 23.310.000 |
| Kaolin | 22.246 | 959.175 | 28.035 | 1.338.672 |
| Ardoise | 193.440 | 12.468.669 | 201.447 | 12.594.139 |
| Phosphate de chaux | 967.485 | 14.796.489 | 844.802 | 13.352.191 |
| Gypse | 273.493 | 4.718.105 | 270.804 | 5.046.454 |
| Borax | 5.962 | 4.764.776 | 6.126 | 3.847.963 |
| Soude naturelle | 1.300 | 103.600 | 1.724 | 246.050 |
| Soude fabriquée | 120.000 | 14.296.800 | 167.000 | 19.896.380 |
| Barytine | 21.548 | 492.266 | 18.371 | 512.924 |
| Magnésite | 1.243 | 40.736 | 1.995 | 76.146 |
| Amiante | 240 | 22.533 | 916 | 59.052 |
| Talc fibreux | 45.804 | 2.615.900 | 60.316 | 3.444.700 |
| Stéatite | 19.087 | 2.081.801 | 17.129 | 1.871.809 |
| Mica | 381 | 243.771 | 343 | 198.684 |
| Feldspath | 19.003 | 432.349 | 22.550 | 539.145 |
| Spath-fluor | 5.805 | 302.015 | 3.628 | 188.759 |
| Onyx | 110 | 150.220 | 66 | 55.685 |
| Corindon et émeri | 1.106 | 567.210 | 349 | 292.152 |
| Grenat | 907 | 181.300 | 1.873 | 483.553 |
| Pierres précieuses | » | 777.000 | » | 1.295.000 |
| Laine minérale (*) | 5.239 | 305.288 | 6.115 | 359.942 |
| Couleurs minérales (vermillon, blanc de céruse, blanc de zinc, etc.) | 142.102 | 58.424.391 | 149.847 | 61.410.050 |
| Alun | 65.304 | 11.188.800 | 68.025 | 11.525.500 |
| Couperose | 13.511 | 539.238 | 12.805 | 361.802 |
| Sulfate de cuivre | 27.215 | 10.442.880 | 20.412 | 6.993.000 |
| Sel (gemme et raffiné) | 1.795.569 | 32.998.615 | 1.712.840 | 32.960.796 |
| Soufre | 488 | 36.550 | 1.676 | 657.601 |
| Brome | 172 | 511.033 | 179 | 531.789 |
| Total | ..... | 1.976.988.124 | ..... | 2.239.745.825 |

(*) Produite par les hauts-fourneaux.

| *Résumé des valeurs.* | 1894 Valeur en francs | 1895 Valeur en francs |
|---|---|---|
| 1° Métaux | 1.005.403.392 | 1.246.397.977 |
| 2° Matières minérales indiquées | 1.976.988.124 | 2.239.745.825 |
| 3° Substances diverses non dénommées (estimation) | 28.490.000 | 25.900.000 |
| Total général | 3.010.881.516 | 3.512.043.802 |

(*Extrait de* The Mineral Industry, Vol. *IV.*)



## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DU CANADA EN 1895.

| | PRODUCTION | VALEUR |
|---|---|---|
| 1° *Métaux.* | tonnes métr. | francs |
| Cuivre | 3.987 | 4.917.006 |
| Plomb | 10.467 | 3.884.824 |
| Nickel | 1.764 | 7.049.897 |
| Mercure | » | 12.137 |
| Or (en kilogrammes) | 2.875kg | 9.898.571 |
| Argent (en kilogrammes) | 55.224kg | 6.001.719 |
| Valeur totale des métaux | ..... | 31.764.154 |
| 2° *Matières minérales.* | | |
| Charbon | 3.568.704 | 40.270.242 |
| Coke | 54.210 | 740.983 |
| Pétrole | 103.371 | 6.222.138 |
| Gaz naturel | » | 2.191.306 |
| Graphite | 224 | 31.857 |
| Minerai de fer | 104.442 | 1.233.203 |
| Pyrites | 34.745 | 531.437 |
| Fer chromé | 3.228 | 213.939 |
| Minerai de manganèse | 127 | 43.843 |
| Ocres | 1.360 | 75.628 |
| Gypse | 300.917 | 1.049.509 |
| Phosphate de chaux (apatite) | 1.851 | 49.547 |
| Castine | 35.132 | 170.505 |
| Pierres à bâtir | » | 6.216.000 |
| Granite | 19.495 | 467.231 |
| Sables et graviers | 281.597 | 613.100 |
| Chaux | » | 4.662.000 |
| Ciment | » | 938.419 |
| Ardoises | » | 35.571 |
| Pierre meulière | 3.982 | 163.336 |
| Argile réfractaire | 1.350 | 18.089 |
| Amiante | 8.896 | 1.907.146 |
| Stéatite | 483 | 11.075 |
| Mica | » | 336.700 |
| Pierres précieuses | » | 8.547 |
| Sel | 60.978 | 934.560 |
| Eaux minérales (litres) | 3.213.962lit | 575.229 |
| Total | ..... | 69.711.135 |
| Matières minérales non dénommées, principalement matériaux de construction, briques, tuiles, poteries, etc | ..... | 15.074.711 |
| Valeur totale | ..... | 116.550.000 |

(*Extrait de l'*Engineering and Mining Journal.)

## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE LA NORVÈGE

## POUR LES ANNÉES 1891, 1892 ET 1893.

| | PRODUCTION EN TONNES MÉTRIQUES | | | VALEUR EN MILLIERS DE FRANCS | | | NOMBRE D'OUVRIERS | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1891 | 1892 | 1893 | 1891 | 1892 | 1893 | 1891 | 1892 | 1893 |
| 1° *Minerais.* | | | | | | | | | |
| Argent | 1,277 | 1,121 | 890 | 807,1 | 686,0 | 606,9 | 433 | 400 | 370 |
| Or | ? | ? | ? | 33,6 | 51,1 | 30,8 | 68 | 61 | 53 |
| Cuivre | 20,939 | 18,888 | 21,907 | 996,8 | 726,6 | 908,5 | 1.003 | 924 | 787 |
| Pyrites de fer et de cuivre | 49,048 | 58,570 | 53,754 | 1.129,1 | 1.080,8 | 985,6 | 342 | 327 | 293 |
| Nickel | 12,839 | 6,959 | 2,397 | 175,7 | 101,5 | 33,6 | 152 | 97 | 46 |
| Cobalt | 187 | 123 | 123 | 70,0 | 46,2 | 63,0 | 135 | 115 | 50 |
| Fer | 1,464 | 860 | 800 | 14,0 | 7,7 | 7,7 | 61 | 6 | 12 |
| Zinc | 498 | 576 | » | 24,5 | 28,0 | » | 71 | 50 | 26 |
| Titane oxydé (rutile) | » | » | 7 | » | » | 8,4 | » | » | 2 |
| Totaux | 86,252 | 87,097 | 79,878 | 3.250,8 | 2.727,9 | 2.644,5 | 2.265 | 1.980 | 1.639 |
| 2° *Métaux.* | | | | | | | | | |
| Argent fin | 4,7 | 4,8 | 4,8 | 784,0 | 677,6 | 611,1 | 22 | 22 | 21 |
| Cuivre | 676,6 | 630,7 | 786,2 | 942,2 | 743,4 | 875,0 | 270 | 112 | 114 |
| Nickel | 135,5 | 96,6 | 113,1 | 522,2 | 284,2 | 366,1 | 60 | 41 | 39 |
| Cobalt | 7,0 | 4,5 | 5,0 | 98,0 | 70,0 | 84,0 | 10 | 10 | 10 |
| Fonte | 421,4 | 610,1 | 335,9 | 28,3 | 36,4 | 18,2 | 19 | 19 | 19 |
| Fer et acier (*) | (593,3) | (487,6) | (439,5) | (192,6) | (130,6) | (123,2) | 54 | 55 | 52 |
| Totaux | 1.245,2 | 1.346,7 | 1.245,0 | 2.374,7 | 1.811,6 | 1.954,4 | 435 | 259 | 255 |

(*) Produits dérivés de la fonte et non compris dans les totaux.

(*Extrait de la* Norges officielle Statistik. Kristiania, 1896.)



# RÉGULATEURS

## ORGANES DE RÉGLAGE ET VOLANTS DES MACHINES.

### THÉORIE DE LA CORRÉLATION DE CES APPAREILS ENTRE EUX (*)

Par M. GEORGES MARIÉ,
Ingénieur chef de division de la Compagnie P.-L.-M., en retraite.

ÉCOLE NATIONALE DES MINES BIBLIOTHÈQUE

### Introduction.

Depuis longtemps déjà plusieurs savants et ingénieurs ont étudié théoriquement les régulateurs à force centrifuge considérés isolément ; comme application de ces études on a même essayé d'adapter aux machines à vapeur des régulateurs isochrones ; mais on n'a pas tardé à reconnaître que les régulateurs isochrones ne pouvaient convenir dans la pratique, à cause de leur instabilité. On ne possédait cependant à ce sujet que des théories très incomplètes, n'abordant que certains côtés de la question.

Frappé de l'insuffisance des théories existantes, j'étudiai la question et je publiai dans les *Annales des Mines*, il y a dix-huit ans, un mémoire intitulé : *Étude comparée des régulateurs de vitesse, de pression, de température et des régulateurs de toutes sortes* (**). Dans ce mémoire je donnai la théorie des régulateurs à force centrifuge,

(*) Mémoire couronné par l'Académie des Sciences (V. *Ann. des Mines*, vol. de 1895 [partie administrative], p. 545).

(**) *Annales des Mines*, 7e sér., t. XIV, 1878, p. 450 et suiv.

avec quelques études nouvelles, notamment sur le régulateur de Farcot. Puis, je posai les bases de ma théorie de la corrélation entre le régulateur, les organes de réglage et le volant, sous le titre : *Régulateurs à maximum et minimum*. C'était une étude partie théorique et partie empirique de la question. Mais, dans cette étude, tout en signalant les différentes perturbations possibles de la marche du régulateur, je n'avais pas pu aborder toutes les questions par le calcul. Il en résulte qu'après avoir examiné la question au point de vue théorique je donnai comme conclusion des règles encore en partie empiriques. Dans la même étude je donnai la théorie complète de la corrélation entre le régulateur, les organes de réglage et le volant dans les régulateurs à embrayages, système dont j'ai montré les inconvénients sérieux. Enfin, j'étudiai les régulateurs de pression à haute pression ou détendeurs, puis les régulateurs à basse pression, employés dans les distributions de gaz d'éclairage, les régulateurs de température, etc..., toujours d'après les mêmes principes. Pour les régulateurs de vitesse, j'ai montré que les régulateurs *isochrones* ne pouvaient s'employer qu'avec un volant infini, qui n'existe pas dans la pratique, et que les régulateurs doivent être d'autant moins sensibles que le volant est plus petit, eu égard à la puissance de la machine ; le but principal de ce mémoire était donc de déterminer la relation qui doit exister entre la sensibilité du régulateur, la masse du volant et la disposition des organes de réglage, de manière à obtenir la meilleure régularité possible, tout en évitant les oscillations du régulateur, désastreuses à tous les points de vue. Ce mémoire de 1878 a rendu, je crois, des services dans l'industrie (*).

Quelques années après, j'eus l'occasion de constater que

(*) Voir à ce sujet un mémoire de M. Compère, ingénieur directeur de l'Association parisienne des appareils à vapeur (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, janvier 1893).



les régulateurs à valve étaient généralement mal établis et qu'ils peuvent, le plus souvent, subir de notables améliorations. Je constatai qu'on pouvait obtenir une excellente régularisation, avec les régulateurs à valve, en munissant la valve d'une garniture métallique connue et en employant certains tours de main usités depuis longtemps dans certains ateliers. A la suite d'un certain nombre d'observations, de recherches et d'expériences, je publiai, dans les *Annales des Mines*, mon deuxième mémoire, intitulé : *Les régulateurs de vitesse* (*).

Dans ce mémoire, je donnai toutes les indications pratiques nécessaires pour la construction des valves et la description d'une nouvelle soupape destinée à être employée surtout pour les machines de faible puissance. En même temps, j'étudiai à nouveau, dans le même mémoire, la question de la corrélation entre le régulateur, les organes de réglage et le volant, en donnant de nouvelles formules, encore en partie empiriques, mais plus théoriques que mes formules de 1879. Ces formules sont d'un emploi facile et sûr. En s'y conformant, on obtient de très bons résultats, comme j'ai eu l'occasion de le constater moi-même dans la pratique. En résumé, dans ce second mémoire, je crois avoir réussi à réhabiliter les régulateurs à valve et à montrer qu'en suivant mes indications on pouvait s'en servir pour régler la marche des machines dans les cas les plus difficiles, comme, par exemple, dans le cas d'un éclairage électrique par incandescence.

J'avais continué, depuis 1887, à perfectionner mes études sur les régulateurs, lorsque l'Académie des Sciences mit au concours la question suivante pour le prix Fourneyron de 1895 : *Perfectionnement de la théorie de la corrélation entre le volant et le régulateur*. — Je n'hésitai pas alors à soumettre au concours

(*) *Annales des Mines*, 8e sér., t. XII, 1887, p. 193 et suiv.

mes deux anciens mémoires précités, en y ajoutant un troisième mémoire, spécialement rédigé pour l'Académie et répondant plus exactement à la question que les deux premiers. Mes nouvelles recherches me permettaient, en effet, de calculer complètement le régulateur, les organes de réglage et le volant et leur corrélation, en me basant uniquement sur une théorie nouvelle; c'est dans cet esprit que j'ai rédigé mon mémoire de mai 1895, présenté à l'Académie. Il est basé, je le répète, uniquement sur des calculs et n'emprunte plus rien à des règles empiriques. Ce sont des calculs approchés, il est vrai, mais du même ordre d'exactitude que ceux que les ingénieurs emploient pour calculer les ponts, les pièces de machines, etc...

L'Académie des Sciences a décerné le prix Fourneyron, en en doublant la valeur en vue du partage, concurremment à l'ensemble de mes trois mémoires, d'une part, et, d'autre part, au mémoire sur la même question présenté par M. Lecornu, Ingénieur en chef au corps des Mines, répétiteur à l'École Polytechnique.

Le travail qui va suivre est la reproduction de mon mémoire de mai 1895, présenté à l'Académie des Sciences; j'y ai ajouté au début quelques notions pouvant permettre au lecteur de le comprendre sans prendre connaissance de mes deux anciens mémoires. Je l'ai complété un peu partout par quelques explications, pour rendre la théorie moins abstraite ; j'ai donné des applications nouvelles aux régulateurs d'Andrade, de Proëll et de Tangye, pour montrer quel usage on pouvait faire de mes formules générales ; enfin, j'ai ajouté des considérations sur le choix du régulateur à faire suivant les cas. J'ai abrégé seulement la partie relative aux régulateurs de pression et de température. Ainsi complété, le mémoire répond bien, je crois, au titre que je lui ai donné. Ce mémoire, tout en étant basé uniquement sur des principes théoriques



pousse l'étude de chaque question jusqu'à la détermination minutieuse, par le calcul, des dimensions pratiques des organes étudiés. Tous les calculs et les formules sont simples, quoique basés sur des considérations quelquefois un peu difficiles ; les applications numériques peuvent se faire en quelques instants.

C'est donc essentiellement un travail destiné aux ingénieurs et leur permettant d'étudier, rapidement et dans leurs détails pratiques, les régulateurs, les volants, les distributions variables, les valves et les soupapes.

Le but de ce mémoire n'est pas de conseiller l'adoption de tel ou tel régulateur nouveau pour abandonner ceux qui existent ; je fais voir, au contraire, que l'on peut faire de notables progrès dans la régularisation des machines en employant les appareils existants, à condition de les calculer comme il convient ; je fais voir cependant que, dans bien des cas, l'on aura intérêt à employer des régulateurs à ressorts plus qu'on ne l'a fait jusqu'à présent, si l'on tient à réduire le poids du volant.

## Définitions et préliminaires.

Dans l'étude qui va suivre, je me propose d'étudier tous les organes des machines à vapeur qui concourent à assurer à la machine une vitesse constante, ou sensiblement constante, malgré les variations du travail moteur et du travail résistant; cette étude est ce qu'on appelle quelquefois l'*étude de la régulation* des machines à vapeur.

Je diviserai ces organes en trois parties : le *régulateur*, le *volant*, et les *organes de réglage*.

On appelle *régulateur de vitesse*, ou simplement *régulateur*, l'organe des machines à vapeur dont une partie appelée *manchon* est une fonction de la vitesse de rota-

tion de la machine. Le manchon est relié soit directement, soit indirectement, à un organe qui est capable de faire varier le travail moteur ; cet organe se compose d'une distribution variable ou d'une valve ou soupape.

Sur l'arbre de la machine se trouve le *volant*, ou masse en mouvement, qui contient à tout moment une certaine provision de force vive pour parer aux variations instantanées du travail moteur et du travail résistant, en attendant que le régulateur ait le temps d'agir.

Nous appellerons *frein* un organe qui est destiné à amortir certaines oscillations du régulateur. Il se compose parfois d'un organe distinct, *frein à huile* ou *cataracte;* parfois, au contraire, il est constitué par le frottement des articulations et des garnitures, comme dans les régulateurs à valve ; dans tous les cas, cet organe a une grande importance comme on le verra.

Nous appellerons organes de réglage l'ensemble des trois organes suivants :

La distribution variable, ou la valve, suivant les cas;

Les organes de transmission, ou bielles, leviers allant du manchon du régulateur à la distribution variable, ou valve ;

Le frein.

L'étude *du régulateur, des trois organes de réglage ci-dessus définis et du volant*, constitue l'étude complète des organes qui assurent à une machine à vapeur une vitesse constante.

Non seulement il faut étudier séparément chacun de ces organes, mais il est, de plus, essentiel de connaître la corrélation qui doit exister entre eux, et c'est ce qu'on ne fait pas dans l'immense majorité des cas. On calcule, en général, le volant d'après les vieilles règles de Coriolis ou du général Morin, que j'étudierai sous le nom de perturbations du premier genre ; puis, on choisit un régulateur stable, isochrone ou sensiblement isochrone, suivant



les goûts et sans se baser sur aucun calcul ; enfin, on place à côté du régulateur un frein à huile pour amortir les oscillations, et l'on croit arriver à la perfection en réglant *à la main* ce frein à huile. Avec cette manière d'opérer, on obtient des résultats satisfaisants, si le hasard fait que le régulateur soit assez stable, et mauvais, s'il est trop sensible eu égard à l'organe de réglage et au volant ; je montrerai que le frein n'est nullement capable de compenser les défauts d'un régulateur, s'il est trop sensible, comme on le croit généralement ; je montrerai que le poids du volant doit dépendre de la sensibilité du régulateur et des organes de réglage; si le volant est trop faible, le frein à huile, je le répète, ne peut nullement compenser la trop grande sensibilité du régulateur. Je montrerai que, dans ce cas, un frein à huile peu puissant n'empêche pas les oscillations rapides du régulateur et de la vitesse et qu'un frein puissant a pour effet de les transformer en oscillations lentes avec variations énormes de la vitesse.

En résumé, il est impossible de régler une machine à vapeur sans étudier la corrélation intime qui doit exister entre le régulateur, les trois organes de réglage définis comme ci-dessus et le volant.

Cette corrélation est étudiée d'une façon complète dans l'étude qui va suivre en se basant uniquement sur des principes théoriques.

Dans toute cette étude je prendrai pour unités, à moins d'une indication contraire, le mètre, le kilogramme et la seconde. Cette remarque a une importance capitale pour l'application de toutes mes formules.

# PREMIÈRE PARTIE.

## ÉTUDE DES APPAREILS RÉGULATEURS DE VITESSE A FORCE CENTRIFUGE.

### I. — § 1. — Principes généraux.

Dans l'étude de chaque régulateur de vitesse, considéré en lui-même, indépendamment du volant et des organes de réglage, il y a deux problèmes à résoudre.

1° Il faut étudier la loi de variation de la vitesse angulaire du régulateur en fonction du déplacement du manchon. Cette loi étant connue, on construit la courbe AB (Pl. VII, *fig.* 1), dans laquelle les abscisses représentent les distances $l$ du manchon au sommet du régulateur, et les ordonnées représentent les vitesses angulaires correspondantes.

Cette courbe étant construite par points, je suppose que les points C′ et D′ correspondent aux positions extrêmes du manchon du régulateur avec la course utilisée. En menant par C′ et D′ des verticales, elles rencontrent en C et D la courbe AB ; en menant ensuite les horizontales CC″ et DD″, on voit que les longueurs OC″ et OD″ représentent les valeurs de la vitesse angulaire $\omega$ correspondant aux positions extrêmes du manchon, avec la course utilisée. Si je désigne par $\omega_1$ la vitesse angulaire correspondant à la position inférieure du manchon, et par $\omega_2$ la vitesse angulaire correspondant à la partie supérieure, le rapport

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}\right)}$$

est ce que j'appelle l'*écart relatif de vitesse* du régulateur pour la course utilisée du manchon. Plus la courbe AB est inclinée par rapport à l'horizontale, plus le régulateur est stable. Quand la courbe AB est horizontale ou presque horizontale (Pl. VII, *fig.* 2), on dit que le régulateur est *isochrone* ou sensiblement isochrone. Quelquefois, la loi de variation de la vitesse angulaire du régulateur en fonction du déplacement du manchon est trop compliquée ; on trace alors la courbe représentant les valeurs de la vitesse angulaire en fonction d'une autre variable connue, par exemple l'angle d'une bielle du régulateur avec l'axe vertical; nous en trouverons un exemple dans l'étude du régulateur de Farcot.



2° Le deuxième problème à résoudre est le suivant: Lorsque le régulateur doit vaincre une certaine résistance, pour mettre en mouvement l'organe de réglage, il en résulte une modification de la vitesse de régime correspondant à chaque position du manchon.

Le problème consiste à déterminer les masses des boules et contrepoids du régulateur, ou la *puissance du régulateur*, de telle façon que la modification de la vitesse de régime soit inférieure à une limite donnée. Si je désigne par F la valeur de la résistance, évaluée au manchon, par $\omega$ la vitesse angulaire du régulateur pour la position considérée du manchon, sans que F agisse, et par $d\omega$ la variation de la vitesse angulaire due à l'influence de F, le rapport $\frac{d\omega}{\omega}$ est ce que j'appelle la *perturbation relative de vitesse* due à la résistance F.

Beaucoup de savants et d'ingénieurs ont étudié les régulateurs à ces deux points de vue et souvent en recherchant les régulateurs isochrones ; nous citerons entre autres : MM. Rolland, membre de l'Institut (*Journal de l'École Polytechnique*, XLIII° cahier) ; Yvon-Villarceau, membre de l'Institut (Académie des sciences, 10 juin 1872) ; Résal, membre de l'Institut (*Mécanique générale*) ;

M. Dwelsauwers-Déry (Liège, imprimerie Dosoer, 1877); Professor Rankine (*The Steam Engine*); Léauté, membre de l'Institut (*Journal de l'École Polytechnique*, XLVII[e] cahier, 1880); Haton de la Goupillière, membre de l'Institut (V. le *Traité des Machines à vapeur* de MM. Alheilig et Roche, p. 50 et suivantes, 1895); Compère, Ingénieur-Directeur de l'Association parisienne des appareils à vapeur (mémoire déjà cité); etc.

## II. — Régulateurs de vitesse a boules et a poids.

§ 2. — **Régulateurs de Watt et de Porter.** — Le régulateur bien connu de Watt est présenté par la *fig.* 5 (Pl. VII).

Nous allons chercher la loi de variation de la vitesse angulaire d'équilibre $\omega$ du régulateur en fonction de l'angle $\alpha$. Pour cela, nous appliquerons l'équation :

$$\Sigma X dx + \Sigma Y dy = 0$$

du travail virtuel pour les déplacements compatibles avec les liaisons. Je prends pour axe des $y$ le prolongement AY de l'axe MA, et pour axe des $x$, une perpendiculaire AX à cet axe, dans le plan considéré de la figure. Nous négligerons, dans ce calcul, la masse des leviers. Nous négligerons aussi, d'abord, les frottements et résistances, et nous en tiendrons compte ensuite. Pour appliquer l'équation générale ci-dessus, considérons la moitié du système situé à droite :

En C, on a :
$$\begin{cases} X = \text{force centrifuge} = \dfrac{P}{g}\,\omega^2 b \sin\alpha \\ Y = \text{poids de la boule} = -P \\ x = \text{abscisse du point C} = b\sin\alpha \\ dx = b\cos\alpha d\alpha \\ y = \text{ordonnée du point C} = -b\cos\alpha \\ dy = b\sin\alpha d\alpha \end{cases}$$



En M, on a :
$$\begin{cases} X = 0 \\ Y = \dfrac{1}{2}\text{ poids du manchon} = -\dfrac{Q}{2} \\ y = \text{ordonnée du point M} = -2a\cos\alpha \\ dy = 2a\sin\alpha d\alpha. \end{cases}$$

Substituons ces valeurs dans l'équation générale; on a :

$$\frac{P}{g}\omega^2 b\sin\alpha \times b\cos\alpha d\alpha - Pb\sin\alpha d\alpha - \frac{Q}{2}\times 2a\sin\alpha d\alpha = 0;$$

d'où :

$$b\cos\alpha = g\left[1+\frac{Q}{P}\times\frac{a}{b}\right]\frac{1}{\omega^2}.$$

Soit $n$ le nombre de tours par minute du régulateur correspondant à la vitesse angulaire; on a :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \qquad \text{d'où :} \qquad \frac{g}{\omega^2} = \frac{g\times(60)^2}{4\pi^2}\times\frac{1}{n^2}.$$

Substituons dans l'équation ci-dessus :

$$b\cos\alpha = \frac{g\times(60)^2}{4\pi^2 n^2}\left(1+\frac{Q}{P}\times\frac{a}{b}\right) = h = \frac{895}{n^2}\left(1+\frac{Q}{P}\cdot\frac{a}{b}\right)$$

(en appelant $h$ la distance verticale de A à la projection des boules sur le régulateur).

La distance AM du manchon au point fixe A est égale à :

$$(1) \qquad h\times 2\times\frac{a}{b} = \frac{g\times(60)^2}{2\pi^2 n^2}\left(1+\frac{Q}{P}\times\frac{a}{b}\right)\times\frac{a}{b} = l$$

(en appelant $l$ cette distance), ou bien :

$$l = \frac{1790}{n^2}\left(1+\frac{Q}{P}\times\frac{a}{b}\right)\frac{a}{b}$$

(en prenant pour unités, comme dans tout ce mémoire, le mètre, le kilogramme et la seconde).

Le problème est donc résolu, c'est-à-dire que nous avons la relation entre la position du manchon et la vitesse

du régulateur exprimée en nombre de tours par minute.

On peut encore l'écrire :

$$n = \sqrt{\frac{1790}{l}\left[1 + \frac{Q}{P}\frac{a}{b}\right]\frac{a}{b}}.$$

J'emploie comme vitesse le nombre de tours $n$ par minute, au lieu de la vitesse angulaire $\omega$, pour avoir recours à une expression plus familière aux praticiens. Mais cela ne veut pas dire que je considère ici la vitesse moyenne du régulateur pendant une minute entière. Dans mon esprit, $n$ n'est autre chose que $\omega$, à une constante près, de sorte que je parlerai souvent des variations que subit $n$ pendant une fraction de minute et même pendant une fraction de seconde.

Soient maintenant $n_1$ et $n_2$ les valeurs de la vitesse correspondant aux valeurs extrêmes $l_1$ et $l_2$ de la position du manchon, entre lesquelles on se propose d'utiliser le régulateur ; $l_1 - l_2$ représente la course utilisée du manchon, que je désignerai par $c$.

Avec l'équation (1) on peut tracer la courbe représentant les valeurs de $n$ en fonction des variations de $l$. Au moyen de cette courbe on pourrait aisément choisir les positions extrêmes $l_2$ et $l_1$ du manchon, de telle façon que le régulateur ait un écart relatif de vitesse déterminée. C'est ce que nous ferons, par exemple, pour le régulateur de Farcot. Mais, pour le régulateur de Watt, il est inutile de tracer cette courbe, et nous allons donner une formule qui en tient lieu.

Cherchons quelles doivent être les dimensions du régulateur et sa vitesse de rotation, pour que l'écart relatif de vitesse :

$$\frac{n_2 - n_1}{\left(\frac{n_2 + n_1}{2}\right)}$$



et la course $l_1 - l_2 = c$ du manchon aient des valeurs données. J'appelle E cet écart relatif de vitesse. On a, en appliquant l'équation (1) :

$$l_1 = \frac{1790}{n_1^2}\left(1 + \frac{Q}{P}\frac{a}{b}\right)\frac{a}{b},$$
$$l_2 = \frac{1790}{n_2^2}\left(1 + \frac{Q}{P}\frac{a}{b}\right)\frac{a}{b};$$

d'où :

$$\frac{\left(\frac{l_1 + l_2}{2}\right)}{l_1 - l_2} = \frac{\left(\frac{n_2^2 + n_1^2}{2}\right)}{n_2^2 - n_1^2}.$$

Soit L la distance du sommet A à la position moyenne du manchon, correspondant au milieu de la course utilisée, le premier nombre de l'équation est égal à $\frac{L}{c}$.

On a donc :

$$\frac{2L}{c} = \frac{n_2^2 + n_1^2}{n_2^2 - n_1^2} = \frac{n_2^2 + n_1^2}{(n_2 + n_1)(n_2 - n_1)}.$$

Or, on peut confondre $n_2$ avec $n_1$, dans cette équation, avec une approximation suffisante ; il vient donc :

$$\frac{2L}{c} = \frac{2n_1^2}{2n_1(n_2 - n_1)} = \frac{n_1}{n_2 - n_1}.$$

Or, $n_1$ est sensiblement égal à $\frac{n_1 + n_2}{2}$ ; donc le deuxième membre est sensiblement égal à $\frac{1}{E}$ ; donc :

$$(2) \qquad \frac{2L}{c} = \frac{1}{E}, \qquad \text{ou :} \quad L = \frac{c}{2E}.$$

Telle est l'équation très simple qui permet de calculer L, en fonction de la course $c$, qu'on veut avoir, et de l'écart relatif de vitesse E qu'on a choisi.

Il est à remarquer qu'on peut faire varier P, Q, $a$, $b$,

sans rien modifier à cette relation. Cette remarque a un grand intérêt pratique; elle montre qu'on peut augmenter la vitesse de régime d'une machine, en augmentant la surcharge du manchon du régulateur de Watt, sans modifier son écart relatif de vitesse.

Ainsi, L étant calculé, on peut choisir à volonté les valeurs de $a$ et $b$ ; mais nous allons maintenant calculer P et Q de telle façon que le régulateur ait la puissance voulue pour vaincre les résistances, sans que la vitesse de régime soit modifiée de plus qu'une quantité donnée.

Soit F la valeur de toutes les résistances que le régulateur doit vaincre, évaluées au manchon du régulateur.

Reprenons la formule (1), où :

$$h = \frac{895}{n^2}\left(1 + \frac{Q}{P}\frac{a}{b}\right);$$

on en tire :

$$Q = P.\frac{b}{a}\cdot\frac{n^2}{895} - P\frac{b}{a}.$$

Représentons par $dQ = F$ la résistance en question, évaluée au manchon ; on a :

$$dQ = 2P.\ \frac{b}{a}\cdot\frac{h}{895}\cdot n.dn = 2P\ \frac{b}{a}\frac{hn^2}{895}\cdot\frac{dn}{n}$$

Or :

$$\frac{hn^2}{895} = \left(1 + \frac{Q}{P}\cdot\frac{a}{b}\right);$$

Donc, en substituant, on a :

$$dQ = 2P\frac{b}{a}\left(1 + \frac{Q}{P}\frac{a}{b}\right)\frac{dn}{n} = 2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)\frac{dn}{n},$$

ou bien :

$$(3)\qquad \frac{dn}{n} = \frac{dQ}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)} = \frac{F}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)}$$



Telle est la formule qui donne la puissance du régulateur ; elle permet de calculer P et Q, mais on reste libre de choisir arbitrairement le rapport de ces deux poids ; on fixe P et Q de telle façon que la perturbation relative de vitesse $\frac{dn}{n}$ ne soit qu'une fraction déterminée de l'écart relatif de vitesse E du régulateur, par exemple $\frac{1}{3}$ de cette valeur ; nous y reviendrons dans la deuxième partie.

Dans le régulateur de Porter à point de suspension unique (Pl. VII, *fig.* 2), on a : $a = b$ ; de plus, on donne aux boules un poids P sensiblement inférieur au poids Q du manchon ; c'est un régulateur à grande vitesse.

L'inconvénient du régulateur de Watt et de Porter est d'exiger de grandes dimensions quand on veut obtenir une faible valeur de E avec une course $c$ suffisamment grande.

§ 3. — **Régulateur de Farcot.** — La *fig.* 6 (Pl. VII) représente le régulateur bien connu de Farcot. Nous allons l'étudier de la même façon.

Soient : P, le poids des boules ; Q, le poids du manchon avec sa surcharge, s'il y en a ; et $2\alpha$, l'angle des bielles entre elles.

Soient :

$$DB = BE' = a, \qquad DC = b, \qquad DD' = EE' = 2l.$$

Le théorème du travail virtuel nous fournit, comme pour le régulateur de Watt, l'équation qui donne la distance $l$ du manchon au sommet du régulateur, en fonction du nombre de tours par minute $n$, pour qu'il y ait équilibre.

Soit encore $l$ la distance du manchon au sommet du régulateur.

On trouve tout d'abord :

$$n^2 = 895\ \frac{\operatorname{tg}\alpha}{b\sin\alpha - e}\left[1 + \frac{Q}{P}\cdot\frac{a}{b}\right].$$

Or :

$$\cos\alpha = \frac{l}{2a};$$

d'où l'on tire :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sqrt{4a^2 - l^2}}{2a}.$$

En substituant, l'on trouve :

$$n = 30\sqrt{\frac{\sqrt{4a^2 - l^2}}{lb\sqrt{1 - \frac{l^2}{4a^2}} - le}\left[1 + \frac{Q}{P}\cdot\frac{a}{b}\right]}.$$

Désignons cette fonction par $f(l)$ ; soit $K = \frac{n}{m}$ le rapport des vitesses du régulateur et du volant en nombre de tours par minute ; soient $l_1$ et $l_2$ les positions du manchon correspondant aux vitesses extrêmes $n_1$ et $n_2$ du régulateur ; on a les relations :

$$f(l_1) = Km_1, \qquad f(l_2) = Km_2, \qquad l_1 - l_2 = c,$$

ou course du manchon, quantité donnée.

Les trois relations permettent de calculer $l_1$, $l_2$ et K, pour un régulateur de dimensions données, en fonction des vitesses du volant $m_1$ et $m_2$.

Mais ces équations sont compliquées, et il est préférable d'aborder la question d'une autre façon.

L'équation précédente peut s'écrire :

$$n = 30\sqrt{\frac{\operatorname{tg} a}{b\sin\alpha - e}} \times \sqrt{1 + \frac{P}{Q}\cdot\frac{a}{b}} = C^{te}\sqrt{\frac{\operatorname{tg} a}{b\sin\alpha - e}}.$$

Cette équation donne la loi des variations de $n$ en fonction de $\alpha$ ; elle nous permet donc de construire la courbe



des valeurs des vitesses $n$, en fonction des angles $\alpha$ ; la *fig.* 8 (Pl. VII) représente cette courbe. Le tableau suivant donne les principales valeurs de $n$ pour $\alpha$ croissant de — 90° à 90° :

| VALEUR DE $\alpha$ | VALEUR DE $n$ | |
|---|---|---|
| — 90° | + ∞ | 1re région, $n$ réel, courbe DO. |
| 0 | 0 | |
| Arc sin $\frac{e}{b}$ | + ∞ | 2e région, $n$ imaginaire. |
| + 90° | + ∞ | 3e région, $n$ réel, courbe ABC. |

Dans la première région on se trouve dans le cas du régulateur représenté par la *fig.* 7 (Pl. VII), système très employé dans la pratique.

Dans la deuxième région, quand $\alpha$ varie de 0 à arc sin $\frac{e}{b}$, on a des valeurs imaginaires de $n$.

Dans la troisième région, quand $\alpha$ varie de arc sin $\frac{e}{b}$ à 90°, l'on se trouve dans le cas du régulateur Farcot proprement dit. Pour savoir quel est l'angle pour lequel le régulateur est isochrone, il faut chercher le point où la courbe a une tangente horizontale en prenant la dérivée $\frac{dn}{d\alpha}$ ; on a une expression dont le numérateur est égal à :

$$(b\sin^3\alpha - e),$$

à un facteur constant près.

La dérivée est nulle pour :

$$\sin^3\alpha = \frac{e}{b}, \qquad \text{ou :} \qquad \alpha = \text{arc sin}\sqrt[3]{\frac{e}{b}};$$

au point B correspondant à cette valeur de $\alpha$, le régulateur est isochrone.

De plus, dans la partie AB de la courbe, le régulateur est instable, tandis que, dans la partie Bc, il est stable ; cette dernière partie est la seule qu'on puisse utiliser dans la pratique.

De même que pour le régulateur de Watt, il est facile de calculer la perturbation relative de vitesse due à une résistance ayant la valeur F, évaluée au manchon; on trouve:

$$\frac{dn}{n} = \frac{F}{2\left[P\frac{a}{b} + Q\right]}.$$

Cette formule est la même que pour le régulateur de Watt.

Le régulateur de Farcot peut donner d'excellents résultats soit en l'employant sans surcharge, comme dans la *fig.* 6 (Pl. VII), soit en l'employant à grande vitesse et avec surcharge, comme dans la *fig.* 3. Mais il ne faut pas l'employer dans la région où il est rigoureusement isochrone, comme avait voulu le faire au début l'inventeur; il faut l'établir de manière à lui donner un écart relatif de vitesse en rapport avec le volant, d'après les formules de la corrélation que je donnerai plus loin.

Au moyen de la courbe de la *fig.* 8 (Pl. VII), il est facile d'établir un régulateur de Farcot ayant un écart relatif de vitesse déterminé.

Nous verrons plus loin comment, en ajoutant un ressort au régulateur de Farcot, on peut obtenir un excellent appareil.

§ 4. — **Régulateurs de Watt et de Porter à points de suspension séparés.** — Le plus souvent, on emploie les régulateurs de Watt et de Porter à points de suspension séparés, comme le représentent la *fig.* 7 (Pl. VII) et la *fig.* 10.



Les formules précédentes du régulateur de Farcot s'appliquent ici en tenant compte des signes.

Ces régulateurs, à dimensions égales, sont plus éloignés de l'isochronisme que les régulateurs de Watt et de Porter à point de suspension unique. On peut cependant obtenir avec eux un écart relatif de vitesse faible, avec une course suffisante du manchon, mais à la condition de leur donner de très grandes dimensions, comme on peut le constater d'après les formules. C'est pourquoi ils conviennent surtout aux machines de grande puissance ayant besoin d'un régulateur grand et puissant.

§ 5. — **Régulateurs divers à boules et à poids.** — Il y a une foule d'autres régulateurs à boules et à poids qui sont aussi bons que les précédents, bien que les précédents suffisent pour tous les cas possibles. On peut les étudier absolument comme les deux précédents, mais on trouvera dans la septième partie des formules générales qui permettent de les étudier plus rapidement.

## III. — Régulateurs de vitesse a boules, a poids et a ressorts.

§ 6. — **Calcul de ces appareils.** — On peut modifier l'un quelconque des régulateurs que nous venons d'étudier en remplaçant la surcharge du manchon par un ressort; je vais montrer qu'il est facile de calculer l'écart relatif de vitesse d'un régulateur ainsi établi.

Si nous prenons par exemple le régulateur de Porter, on a trouvé au § 2 :

$$\frac{dn}{n} = \frac{F}{2\left[P\frac{a}{b} + Q\right]}$$

Désignons par R l'effort de compression initiale du ressort, quand le manchon est en bas de sa course, et par R′, cet effort quand il est en haut. Supposons que cette compression remplace complètement la surcharge Q du manchon. Dans ces conditions, l'écart relatif de vitesse du régulateur sera égal, tout d'abord, à celui qui résulte de la formule précédente, dans laquelle on fait Q = R, puis à celui qui résulte de la formule :

$$\frac{dn}{n} = \frac{R' - R}{2\left[P\frac{b}{a} + R\right]}.$$

Quant à la perturbation relative de vitesse due à l'effort F, évalué au manchon, elle est égale à :

$$\frac{dn}{n} = \frac{F}{2\left(P\frac{b}{a} + R\right)},$$

puisque R remplace Q.

Si, en outre de R, on laissait au poids Q une certaine valeur, cette dernière formule deviendrait :

$$\frac{dn}{n} = \frac{F}{2\left(P\frac{b}{a} + Q + R\right)}.$$

On peut encore étudier directement ces régulateurs, en tenant compte du ressort, du premier coup, comme on le verra dans la septième partie.

§ 7. — **Régulateurs à bielles croisées, à poids et à ressort.** — Si l'on applique ce principe à l'établissement d'un régulateur de Porter à ressort, à point de suspension unique ou à points de suspension séparés, on obtient un appareil s'éloignant un peu trop de l'isochronisme, ce qui oblige à lui donner de très grandes dimensions. Mais le ressort est d'un emploi excellent avec le régulateur de



Farcot ; en effet, le ressort tend à diminuer l'isochronisme du régulateur ; or, comme le régulateur de Farcot peut être aussi isochrone que l'on veut, l'inconvénient du ressort disparait ; il ne reste plus que son avantage, qui consiste à diminuer les perturbations de la position du manchon du régulateur en diminuant l'inertie du système, comme on le verra plus loin dans l'étude de la corrélation entre le volant et le régulateur.

On peut obtenir ainsi un très bon régulateur en faisant usage de la courbe BC de la *fig.* 8 (Pl. VII) et d'un ressort ; on calculera l'écart de vitesse dû à la variation de compression du ressort suivant la formule ci-dessus. Mais il se peut que l'on ne puisse disposer ainsi que d'une course insuffisante pour le manchon ; alors il ne faudra pas hésiter à avoir recours à la courbe AB (même figure) du régulateur de Farcot, courbe qui correspond au régulateur instable. Dans ce cas, la courbe du régulateur donnera un écart relatif de vitesse négatif, le ressort donnera un écart relatif de vitesse positif ; si ce dernier est plus grand que le premier, l'écart relatif de vitesse du régulateur avec ressort sera positif, et le régulateur sera stable, c'est-à-dire d'un emploi pratique, et aussi près qu'on le voudra de l'isochronisme.

Ce raisonnement suppose, bien entendu, que, dans les limites de la course utilisée du manchon, la courbe est assez voisine d'une ligne droite.

La *fig.* 9 (Pl. VII) représente le régulateur de Farcot à poids et à ressort.

J'ai proposé cet appareil dans mon étude de 1887 ; cette disposition est intéressante, comme on le verra plus loin, dans l'étude de la corrélation entre le volant et le régulateur ; elle a le petit inconvénient d'exiger l'emploi d'un axe vertical assez long ; on peut obvier à cet inconvénient en soutenant l'axe au-dessus du régulateur, en le faisant tourner dans un coussinet fixe.

Ainsi que je l'ai indiqué dans mon étude de 1887, il est facile de disposer le régulateur de telle façon qu'on puisse faire varier à volonté la distance DD′ des points de suspension ; de cette façon, on peut régler la stabilité, ou écart relatif de vitesse du régulateur, suivant les besoins.

Cette précaution n'est cependant pas nécessaire, si l'on calcule bien le volant de manière à éviter les oscillations, comme on le verra plus loin.

Le ressort travaille à l'extension, de préférence à la compression, pour éviter les frottements et coïncements que donnerait un ressort comprimé. On peut ainsi régler la vitesse de régime en réglant la tension du ressort.

On trouvera, à la fin du mémoire, les calculs relatifs au régulateur à ressort de Tangye et analogues, appareils très intéressants doués également d'une grande puissance et d'une faible inertie.

§ 8. — **Régulateur de Foucault.** — Je ne parlerai pas ici du régulateur à ailettes de Foucault, dont j'ai rappelé la théorie dans mon mémoire de 1878 ; ce régulateur est employé dans des mouvements d'horlogerie, et il est capable de créer par lui-même un travail résistant considérable ; l'étude de cet appareil sortirait de la question traitée dans le présent mémoire ; mais il est à noter que l'appareil a servi de base à l'établissement du régulateur dans le volant, appareil dont je vais m'occuper à présent.

§ 9. — **Régulateurs à ressorts dans le volant.** — Beaucoup de machines modernes à grande vitesse sont munies de régulateurs à ressorts placés dans le volant ; ces appareils diminuent l'encombrement de la machine, ce qui est intéressant. Mais ils ont surtout les grands avantages suivants : ils peuvent se construire aisément pour donner un écart relatif de vitesse déterminé, comme on va le voir ; en outre, on verra plus loin que, comme tous les régulateurs



à ressorts, ils sont beaucoup moins sujets aux oscillations que les régulateurs à boules et à manchons pesants. Ils offrent donc un très grand intérêt au point de vue pratique, et c'est pourquoi je vais en présenter la théorie complète.

Comme on le sait, les machines dynamos tournent à une très grande vitesse ; il y a donc une certaine difficulté pour l'établissement des transmissions, quand on veut les conduire avec une machine à vapeur ne faisant que 60 à 70 tours. On a été alors amené à porter la vitesse de la machine à vapeur à 150 et même à 300 tours par minute. On a même été jusqu'à commander directement la dynamo par une machine à vapeur montée sur le même arbre, et faisant, par suite, le même nombre de tours, ce qui supprime toute transmission.

Il résulte de ces nouvelles dispositions que l'arbre principal de la machine à vapeur tourne assez vite pour qu'on puisse en faire l'axe d'un excellent régulateur ; on évite alors la transmission de mouvement de l'arbre de la machine à l'axe du régulateur ; c'est une simplification et c'est aussi une condition de sécurité. Nous allons donner brièvement la théorie de ces régulateurs.

La *fig.* 5 (Pl. IX) représente un de ces appareils monté sur le volant même de la machine à vapeur (croquis théorique).

Soit AB l'axe de la machine sur lequel est calé le volant, dont la jante est représentée par sa section en CD ; deux contrepoids pesants P et P′ peuvent se mouvoir le long des rayons ou bras du volant CE et DF, entre deux arrêts représentés sur la figure et qui limitent la course de ces contrepoids à quelques centimètres seulement. Sous l'action de la force centrifuge, ces contrepoids P et P′ tendent à s'écarter et à vaincre l'action des ressorts antagonistes G, H.

Le mouvement des contrepoids P et P′ est transmis

par des bielles à un manchon M qui tourne avec le volant et son axe, mais qui peut se déplacer longitudinalement, entre les arrêts I et K. La gorge LN du manchon est reliée au moyen d'une fourche avec la valve ou la distribution variable de la machine à vapeur. S'il s'agit d'une valve, elle doit être ouverte en grand quand le manchon touche à son arrêt I, et fermée quand il touche à son arrêt K.

Tel est le principe de l'action du régulateur. On doit remarquer que la force centrifuge et la résistance du ressort sont les seules forces en action ; l'action de la pesanteur est nulle sur l'équilibre du système, car le poids de P est détruit par celui de P′, par l'intermédiaire du manchon.

Cela posé, nous allons chercher la loi de l'équilibre du système, ou bien la valeur de l'écartement des contrepoids en fonction de la vitesse angulaire.

Soient :

$r$, la distance de l'axe au centre de gravité des poids P et P′ ;

$a$, la demi-hauteur d'un contrepoids ;

R, la distance de l'axe à l'intérieur de la jante ;

$l$, la longueur du ressort correspondant à $r$ ;

$k$, la longueur du ressort supposé abandonné à lui-même et détendu.

Il est clair que la résistance du ressort est définie par la relation $F = s(k - l)$, dans laquelle $s$ représente la compression en kilogrammes par mètre de course à partir de la longueur $k$ où la compression est nulle, ou encore en grammes par millimètre de course.

Soient, enfin, $m$ la masse d'un contrepoids, et $\omega$ la vitesse angulaire ; on a évidemment :

$$F = s(k - l) = m\omega^2 r.$$

Or :

$$= R - a - r.$$



Donc :

$$k - l = k + a + r - R.$$

Donc :

$$F = s(k + a + r - R) = m\omega^2 r ;$$

d'où :

$$r(m\omega^2 - s) = s(k + a - R).$$

D'où l'on tire :

$$(1) \qquad r = s\frac{k + a - R}{m\omega^2 - s}.$$

Telle est l'équation fondamentale du régulateur.

Il est facile de voir dans quelle condition il est isochrone ; il faut que $r$ soit indéterminé, ou de la forme $\frac{\text{zéro}}{\text{zéro}}$ ; il faut pour cela que :

$$k + a - R = 0, \qquad \text{et :} \quad m\omega^2 - s = 0.$$

La première relation veut dire que le ressort doit être sans compression ou détendu, quand le centre de gravité des contrepoids arrive sur l'axe. On peut imaginer une disposition mécanique qui réalise cette condition.

La deuxième relation donne la vitesse correspondante :

$$\omega^2 = \frac{s}{m}, \qquad \text{ou :} \quad \omega = \sqrt{\frac{s}{m}}.$$

Un tel régulateur représente complètement le régulateur isochrone de Foucault dont nous avons parlé dans notre premier mémoire ; il ne peut s'appliquer aux machines à vapeur.

Pour que le régulateur puisse servir, il faut qu'il ait une certaine stabilité, ce qui ne se produira que si $k + a$ est plus petit que R, condition bien facile à réaliser.

Continuons l'examen du régulateur comme pour les régulateurs de vitesse que nous avons étudiés dans nos précédents mémoires. Cherchons dans quelles conditions il faut établir le ressort pour que le régulateur ait une

stabilité déterminée correspondant à un écart relatif de vitesse donné. Posons d'abord :

$$R - k - a = b;$$

l'équation (1) devient :

$$(2) \qquad r = s\,\frac{b}{s - m\omega^2};$$

d'où l'on tire :

$$r(s - m\omega^2) = b;$$

d'où :

$$m\omega^2 r = s(r - b);$$

d'où :

$$\omega^2 = \frac{s(r-b)}{mr}.$$

Différentions les deux membres, on a :

$$2\omega d\omega = \frac{[mrs - s(r-b)\,m]\,dr}{m^2r^2},$$

$$2\omega d\omega = \frac{[mrs - srm + sbm]\,dr}{m^2r^2} = \frac{sbm}{m^2r^2}\,dr = \frac{sb}{mr^2}\,dr.$$

Ainsi :

$$2\omega d\omega = \frac{sb}{mr^2}\,dr.$$

Divisons cette équation, membre à membre, par l'équation :

$$\omega^2 = \frac{s(r-b)}{mr},$$

il vient :

$$2\,\frac{d\omega}{\omega} = \frac{sbdr}{mr^2} \times \frac{mr}{s(r-b)} = \frac{dr}{r} \times \frac{b}{r-b};$$

d'où, en posant :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \varepsilon,$$

$$(3) \qquad \frac{d\omega}{\omega} = \frac{1}{2} \times \frac{dr}{r} \times \frac{b}{r-b} = \varepsilon,$$



d'où :

$$b = \frac{2 \times \varepsilon \times r^2}{dr + 2\varepsilon \times r},$$

équation qui permet de calculer $b$ en fonction de $\varepsilon$.

Or, dans cette équation, $\frac{d\omega}{\omega}$, ou $\varepsilon$, est l'écart de vitesse correspondant à une variation relative $\frac{dr}{r}$ de la distance du contrepoids à l'axe ; en d'autres termes, si on appelle $dr = c'$ la course des contrepoids entre leurs arrêts, l'écart relatif de vitesse entre les deux positions extrêmes de ce contrepoids est égal à :

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{\omega} = \frac{1}{2} \times \frac{c'}{r} \times \frac{b}{r-b}$$

($b$ est une constante $= R - k - a$, comme on l'a vu ci-dessus).

Au lieu de la course des contrepoids, on peut introduire facilement dans cette formule la course $c$ du manchon en fonction du rapport connu des deux courses $c'$ et $c$.

Il est curieux de remarquer que $s$ et P n'entrent plus dans cette formule ; on peut donc changer la puissance du ressort et le poids des contrepoids sans modifier l'écart relatif de vitesse du régulateur.

Il nous reste à rechercher, comme dans tous les régulateurs de vitesse, quelle est la perturbation relative de vitesse introduite par une résistance évaluée sur le manchon M du régulateur ; la formule trouvée permettra de calculer le poids des boules du régulateur nécessaire pour mettre en mouvement une valve ayant une résistance donnée.

Considérons la relation :

$$F = m\omega^2 r.$$

Différentions les deux membres :

$$dF = 2\omega m r d\omega ;$$

divisons membre à membre par l'équation précédente ; on a :

$$\frac{dF}{F} = \frac{2\omega m r d\omega}{m\omega^2 r} = 2\frac{d\omega}{\omega};$$

d'où :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{1}{2}\frac{dF}{F}. \tag{4}$$

Cette équation donne la valeur de la perturbation relative de vitesse introduite par un effort ou résistance $dF$ appliquée à chaque contrepoids.

Désignons par $f$ la valeur de la somme de ces deux résistances appliquées cette fois au manchon M; on a :

$$dF = f\frac{c}{2c'}$$

($c'$ et $c$ étant les courses du contrepoids et du manchon M entre leurs arrêts).

On en déduit la relation :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{1}{2} \times \frac{c}{2c'} \times \frac{f}{F};$$

d'où :

$$F = \frac{\frac{1}{2} \times \frac{c}{2c'} \times f}{\frac{d\omega}{\omega}}, \tag{5}$$

équation qui permet de calculer F ou, autrement dit, la puissance du régulateur, en fonction de la perturbation relative de vitesse $\frac{d\omega}{\omega}$ qu'on se propose de ne pas dépasser.



Cette équation peut se mettre sous la forme :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{f}{2F} \times \frac{c}{2c'} = \frac{f}{4F\left(\frac{c'}{c}\right)}.$$

Il est intéressant de remarquer que la formule est exactement la même que celle du régulateur de Porter, ou :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2Q};$$

en effet $f$ remplace ici F, et $F \times \frac{2c'}{c}$ remplace ici Q.

Ces formules serviront au § 21.

Ces équations étant posées, voici quelle est la marche à suivre pour le calcul du régulateur :

On détermine d'abord le poids du volant de la machine à vapeur et l'écart relatif de vitesse $\varepsilon$ à choisir, suivant les règles que nous donnerons plus loin.

Puis, on applique la formule (5) pour calculer F en fonction de $f$, en faisant $\frac{d\omega}{\omega}$ sensiblement plus petit que $\varepsilon$, soit $\frac{1}{4}$ de cette valeur, par exemple ; on en tire la valeur de F.

Puis, on applique la formule (3), qui donne $b$ en fonction de $\varepsilon$, de $r$ et de la course $\delta r = c$.

Puis, on se donne R et $a$ arbitrairement, et on calcule $k$ par la formule :

$$R - k = a - b.$$

Puis, on calcule la raideur du ressort, définie par le coefficient $s$, par la formule :

$$s(k - l) = F.$$

Puis, on calcule le poids de chaque contrepoids par la

formule :

$$m\omega^2 r = \frac{P}{g}\omega^2 r = F,$$

$r$ étant le rayon pour la position moyenne des contrepoids.

Le rapport des courses $\frac{c'}{c}$ peut se donner arbitrairement; il est généralement voisin de l'unité.

Le calcul de tous les éléments du régulateur est, comme on le voit, des plus simples.

Ce système, avec des variantes dans les dispositions, a été appliqué par de nombreux constructeurs de machines à vapeur dans les perfectionnements qui ont été apportés à ces machines.

Nous citerons, en particulier, le régulateur des machines Weyher et Richemond, qui est basé sur ce principe, avec les modifications suivantes : les contrepoids se meuvent, non pas suivant un rayon, mais suivant un arc de cercle qui est tangent à un rayon, et qu'on peut confondre avec un rayon pour un petit déplacement considéré ; les ressorts ne sont pas comprimés, mais ils agissent par extension, ce qui revient absolument au même au point de vue du calcul. Cette disposition donne moins de frottement que celle que nous avons figurée ; on évite, en effet, le frottement résultant du glissement des contrepoids sur les rayons.

Il existe aujourd'hui un grand nombre de machines à grande vitesse qui sont réglées par des appareils analogues.



# DEUXIÈME PARTIE.

## CALCUL DU RÉGULATEUR DES ORGANES DE RÉGLAGE ET DU VOLANT DANS LES MACHINES OU LE RÉGULATEUR AGIT DIRECTEMENT SUR LA DISTRIBUTION AU MOYEN D'UN DÉCLIC.

### I. — Théorie des régulateurs a maximum et minimum (*).

§ 10. — **Cas d'une machine idéale.** — Considérons une machine à vapeur conduisant un atelier ; soit $\omega$ la vitesse angulaire de rotation du volant ; nous nous proposons de munir la machine d'un régulateur tel que la vitesse angulaire $\omega$ ne puisse jamais sortir de deux limites $\omega_1$ et $\omega_2$ ($\omega_1$ étant le minimum, et $\omega_2$ le maximum), et cela quelles que soient les variations du travail résistant entre son maximum et zéro ; ce dernier cas se présenterait si la courroie principale de l'atelier venait à tomber.

Il va de soi que l'écart relatif de vitesse

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}}$$

doit être choisi d'autant plus petit que l'atelier demande plus de régularité. On peut descendre jusqu'à $\frac{4}{100}$ pour la valeur de ce rapport, et même au dessous, dans les cas les plus difficiles ; nous donnerons plus loin des règles précises à ce sujet.

(*) Cette théorie figure dans mon premier mémoire ; c'est le point de départ de toutes mes études sur les régulateurs.

Pour que $\omega$ ne sorte jamais des limites $\omega_1$ et $\omega_2$, je munis la machine d'un régulateur à force centrifuge ayant une vitesse de rotation proportionnelle à celle du volant; je calcule ce régulateur d'après les règles exposées dans la première partie, de manière que les positions extrêmes du manchon correspondent à des nombres de tours $n_1$ et $n_2$ par minute, du régulateur, proportionnels aux valeurs $\omega_1$ et $\omega_2$. Cela posé, faisons les hypothèses suivantes.

*Première hypothèse.* — Je suppose que la position du manchon du régulateur soit une fonction de la vitesse angulaire $\omega$ et de cette variable seulement. Je suppose aussi que ce manchon soit relié directement à l'organe de réglage de la distribution; je suppose, en outre, que cette liaison soit établie de telle façon que l'admission soit nulle quand le manchon est en haut de sa course, et que le travail moteur soit supérieur au travail résistant maximum quand le manchon est en bas de sa course.

*Deuxième hypothèse.* — Je suppose la distribution assez douce à mouvoir et le régulateur assez puissant pour que le mouvement de son manchon ne soit nullement influencé par les frottements ni par l'effort à faire pour mouvoir l'appareil de distribution variable.

*Troisième hypothèse.* — Je suppose que le moment du travail moteur et le moment du travail résistant soient constants par rapport à l'axe du volant, dans chacune de ces révolutions; cela suppose donc un travail moteur régulier comme celui d'une turbine et non par coups de pistons.

*Quatrième hypothèse.* — Je suppose que le manchon du régulateur fasse varier le travail moteur aussitôt qu'il se déplace; cela ne se produit pas exactement dans la pratique, quand le manchon du régulateur se déplace



pendant la détente, dans la machine à cylindre unique, puisque le régulateur n'agit qu'en réglant le degré de l'admission.

*Cinquième hypothèse.* — Je suppose que le manchon du régulateur ne soit pas influencé par l'inertie des pièces de ce régulateur; cette hypothèse n'est pas réalisée, par exemple, quand le manchon surchargé d'un régulateur de Porter est lancé par sa vitesse acquise au-delà de la position correspondant à la vitesse de rotation du régulateur.

*Sixième hypothèse.* — Je suppose, enfin, que les variations du travail moteur dues aux déplacements de l'appareil de réglage de la distribution soient sensiblement proportionnelles aux déplacements du manchon du régulateur.

Si toutes ces conditions sont réalisées, il est bien évident que la vitesse angulaire de rotation du volant ne pourra jamais sortir des limites fixées $\omega_1$ et $\omega_2$.

En effet, si, par suite d'une diminution du travail résistant, la vitesse $\omega$ du volant s'accélère jusqu'à $\omega_2$, le manchon du régulateur sera en même temps au haut de sa course, comme on l'a vu ci-dessus, et la force motrice sera supprimée complètement ; donc $\omega$ ne peut dépasser $\omega_2$.

D'autre part, supposons que le travail résistant, après avoir été faible, devienne plus considérable; alors le travail moteur, qui était égal, précédemment, au travail résistant faible ne suffit plus, et la vitesse du volant diminue; supposons que la vitesse angulaire tombe jusqu'à $\omega_1$; mais alors le manchon est en bas de sa course, et nous avons supposé ci-dessus que, dans ce cas, le travail moteur devait être supérieur au travail résistant maximum; donc la vitesse $\omega$ ne peut tomber au-dessous de $\omega_1$.

On voit donc que, dans ces conditions, $\omega$ reste toujours

comprise entre $\omega_1$ et $\omega_2$; c'est pourquoi, dans mon mémoire de 1878, j'ai donné le nom de « régulateurs à maximum et minimum » aux régulateurs à action directe.

§ 11. — **Réalisation pratique des hypothèses précédentes.** — Les anciennes distributions variables à tiroirs, la distribution Meyer par exemple, sont trop dures à mouvoir pour être mises en mouvement directement par un régulateur à force centrifuge, même très puissant; en effet, ces distributions exigent toute la force d'un homme agissant sur une vis pendant plusieurs tours, lorsqu'on veut les faire varier d'un bout à l'autre, tandis que le manchon d'un régulateur, même très puissant, ne peut exercer qu'un effort de quelques kilogrammes sur une longueur de quelques centimètres. On verra plus loin comment on peut mettre ces distributions en mouvement par une liaison indirecte, au moyen d'un embrayage. Mais, comme je le montrerai, la pratique est d'accord avec la théorie pour donner la préférence à l'action directe du régulateur sur la distribution. C'est dans ce but que la distribution à déclic des machines Corliss a été imaginée et imitée par presque tous les constructeurs depuis une vingtaine d'années.

Je ne donnerai pas ici la description de la machine Corliss, qui est très connue; je rappellerai seulement le principe de l'action directe du régulateur sur la distribution variable au moyen du déclic, car il est nécessaire de bien préciser cette disposition avant de passer à la théorie de la corrélation entre le régulateur, les organes de réglage et le volant dans les machines Corliss.

La *fig.* 1 (Pl. IX) représente l'ensemble du système de déclic dans une des plus anciennes dispositions de la machine Corliss. La tige AB commande le distributeur d'admission de vapeur, de manière à fermer l'admission quand elle se meut dans le sens de la flèche. Cette tige AB est



fixée par son extrémité B à l'extrémité D de l'organe de déclic DEG tant que le déclic ne fonctionne pas. Le déclic est entraîné par son axe E dans le mouvement du balancier vertical EH, quand ce dernier oscille autour de l'axe fixe H; il en résulte que, lorsque le déclic DEG n'est pas rompu, il fonctionne comme s'il était soudé par son extrémité D au point B de la tige AB. Cette fixation des deux extrémités est obtenue au moyen du petit ressort I, qui appuie le point D sur B, et au moyen du grand ressort à lame JKL; ce ressort, encastré suivant JK, dans le métal du grand levier vertical EH, tend à tirer la tige AB dans le sens de la flèche T et oblige ainsi la tige AB à suivre le déclic DEG lorsque celui-ci est entraîné par le mouvement du levier EH. Enfin, le levier vertical est animé d'un mouvement de va-et-vient autour de l'axe fixe H, mouvement qui est donné par l'excentrique et les bielles NOP; l'excentrique est naturellement mis en mouvement par l'arbre moteur.

Si donc le déclic ne fonctionnait pas, on aurait ainsi une distribution à admission fixe, commandée par un excentrique; c'est ce qui se passe, en effet, lorsque le régulateur ne fonctionne pas; l'admission ainsi obtenue est très grande; dans bien des types de machines Corliss, elle dépasse 50 p. 100. Nous verrons plus loin qu'il ne faut pas l'exagérer.

Voici maintenant comment le régulateur intervient pour fermer l'admission au moment voulu, suivant la demande du travail résistant.

L'organe de déclic dans sa partie EG a la forme courbe représentée par la figure.

D'autre part, le manchon M du régulateur est relié par la bielle MS au levier coudé SR, lequel est terminé par la touche Q.

Il en résulte que, lorsque l'admission est ouverte et que l'organe de déclic se meut dans le sens de la flèche U

avec tous les organes dont il est solidaire, il arrive un moment où la partie EG du déclic rencontre la touche Q; alors l'extrémité D du déclic se soulève, et il se produit ce que j'appelle la rupture du déclic; la tige AB est fortement tirée par le ressort LJ, et cela jusqu'à ce que le mouvement de la tige AB soit arrêté par la fermeture complète de l'admission; le tracé L'J représente le ressort à lame dans cette position extrême. Le frein à air V sert à amortir ce mouvement de fermeture à l'admission, pour éviter de briser des pièces par la violence du choc.

On voit donc que l'admission se fermera pour un degré d'admission plus ou moins élevé, suivant que la touche Q se trouvera plus ou moins haut, au moment de la rencontre; comme la touche monte quand le manchon M du régulateur descend, et inversement, on voit que le degré d'admission augmente à mesure que la vitesse du régulateur et de la machine diminue. Tout est combiné pour que l'admission soit nulle lorsque le manchon du régulateur est en haut de sa course.

On voit donc, en résumé, que, bien qu'il n'y ait pas, à proprement parler, action directe du régulateur, il existe cependant entre le régulateur et l'organe de réglage de distribution une liaison équivalente à cette action directe au point de vue de l'application de la théorie du régulateur à maximum et minimum que j'ai donnée ci-dessus.

Pour mieux préciser ma pensée, je reviendrai à l'examen des six hypothèses de cette théorie dans le cas de la machine Corliss.

La première et la deuxième hypothèses sont réalisées à condition que le régulateur soit assez puissant pour que la réaction de l'organe ne fasse pas bouger trop sensiblement le manchon du régulateur au moment du choc produit par le déclic. Nous reviendrons plus loin sur la manière de calculer la puissance du régulateur et de son frein pour éviter cet inconvénient.



La troisième, la quatrième et la cinquième hypothèses ne sont pas réalisées, naturellement, comme dans toutes les machines à vapeur. Nous verrons comment il faut calculer la corrélation entre le volant et le régulateur pour qu'il n'en résulte aucun inconvénient dans la pratique.

Enfin, la sixième hypothèse est assez bien réalisée avec les régulateurs agissant sur la distribution, comme dans le cas actuel, et nullement avec les régulateurs à valve, comme on le verra plus loin.

Je rappellerai que, dans les machines Corliss, le manchon du régulateur est relié à un frein à huile de peu de puissance, qui sert à empêcher ce manchon d'être trop sensiblement déplacé par le choc du déclic et qui sert aussi à empêcher le mouvement du manchon d'être troublé par les effets de l'inertie du régulateur; nous reviendrons plus loin sur le fonctionnement de cet organe et sur le calcul de sa puissance.

La disposition que je viens de donner du déclic de la machine Corliss est relative aux machines déjà anciennes; il existe une foule de dispositions modernes dérivées de la machine Corliss; il est inutile de les rappeler ici, car, au point de vue de la théorie, elles rentrent dans le type que je viens de décrire.

## II. — Théorie des perturbations du premier genre de la position du manchon du régulateur.

§ 12. — **Théorie de ces perturbations.** — Dans la deuxième hypothèse du § 10, j'ai supposé dans ma théorie que le moment du travail moteur par rapport à l'axe du volant était constant pendant chaque révolution de ce volant; de même, pour le travail résistant.

En ce qui concerne le travail résistant, cette hypothèse

est le plus souvent assez bien réalisée dans la pratique, jusqu'au moment où ce travail résistant change brusquement ; après quoi son moment devient constant pendant chaque révolution. Mais, en ce qui concerne le travail moteur, la deuxième hypothèse n'est nullement réalisée dans la pratique ; elle en est même très loin, quand la machine n'a qu'un cylindre et marche avec une grande vitesse ; elle est réalisée un peu mieux dans les machines compound ou dans les machines à deux cylindres.

Nous allons examiner ce qui se passe alors pendant une révolution du volant, en rappelant ici très brièvement l'ancienne théorie classique des volants, celle qui est généralement exposée dans les ouvrages sur les machines à vapeur et qui est due, je crois, à Coriolis.

Supposons le régime établi de telle façon que le travail moteur par tour de volant soit égal au travail résistant ; la vitesse $\omega$ repasse par la même valeur à chaque révolution.

Le travail moteur par tour de volant varie en fonction du travail résistant, suivant une certaine loi, et le travail résistant par tour de volant, suivant une autre. Je suppose que tous deux puissent être considérés comme indépendants de la vitesse dans les limites considérées, c'est-à-dire en supposant que la vitesse s'éloigne peu de la vitesse normale.

Je représente par deux courbes (Pl. IX, *fig.* 6) la valeur des moments des efforts moteurs et celle des moments des efforts résistants, pour chaque position du volant, pendant une révolution. Les abscisses représentent les chemins parcourus par un point du volant, situé sur une circonférence de rayon choisi arbitrairement ; les ordonnées représentent alors la valeur des efforts moteurs et résistants évalués à ce point.

Soit ABC la courbe des moments des efforts résistants, en kilogrammes ; cette courbe est généralement une ligne



droite horizontale, mais nous la supposons ici quelconque, pour plus de généralité. Soit DEF la courbe des moments des efforts moteurs, en kilogrammes. Ces deux courbes sont généralement périodiques, la période étant $2\pi$ ; elle peut d'ailleurs être plus faible et avoir par exemple comme valeur $\pi$ et même $\frac{\pi}{2}$, suivant le nombre de cylindres.

Puisque nous avons supposé le régime établi de telle façon que le travail moteur par tour de volant fût égal au travail résistant, on voit que la somme des surfaces MN + PQ est égale à la somme des surfaces ombrées NP + QR. Soient S, $s$, S', $s'$, ces quatre surfaces ; $\omega_m$, $\omega_n$, $\omega_p$, $\omega_q$, $\omega_r$, les vitesses angulaires du volant dans les positions correspondant aux points M, N, P, Q, R. Soit I le moment d'inertie du volant, en y englobant les transmissions et les diverses pièces en mouvement de l'atelier, rapportées à la vitesse angulaire du volant.

On a : $\frac{I}{2}(\omega^2_n - \omega^2_m) = S$, formule qui permet de calculer $\omega_n$ en fonction de I et de $\omega_m$. On calculera de même $\omega_p$, $\omega_q$ et $\omega_r$ de proche en proche et, par suite, en fonction de I et de $\omega_m$.

Pour que le problème soit complètement déterminé, il reste à ajouter que nous désirons que la moyenne de toutes ces valeurs $\omega_m$, $\omega_n$, $\omega_p$, $\omega_q$, $\omega_r$, soit égale à la valeur $\Omega$ que nous assignerons comme vitesse de régime à la machine.

Soit $\omega'$ la plus petite de ces valeurs, et $\omega''$ la plus grande ; la valeur $\frac{\omega'' - \omega'}{\Omega}$ est ce que nous appellerons l'*écart relatif de vitesse* du volant dans l'intervalle d'une révolution.

Voilà l'exposé de l'ancienne théorie des volants, sous une forme appropriée aux besoins de ma théorie ; voici maintenant les conclusions que j'en vais tirer.

Il faut généralement que l'écart relatif de vitesse du volant soit sensiblement plus petit que l'écart relatif de vitesse du régulateur, et cela pour le motif suivant.

Si l'écart relatif de vitesse n'est pas sensiblement plus petit que celui du régulateur, il pourra se produire des oscillations très rapides et périodiques du manchon du régulateur et, par suite, de l'organe de réglage de la distribution, ce qui troublerait la marche de la machine. Cependant, il faut remarquer que, quand on emploie des régulateurs très lourds, et lorsque la vitesse de rotation du volant est grande, cet inconvénient est très atténué, à cause de l'inertie du régulateur, qui est incapable de suivre toutes les petites variations très rapides de la vitesse. D'autre part, quand le régulateur est mis en mouvement par une courroie, l'élasticité de cette courroie lui permet de tourner plus régulièrement que le volant, ce qui diminue encore les oscillations du manchon.

Enfin, le frein à huile et tous les frottements servent aussi à diminuer les oscillations du manchon dues à cette cause ; les variations de vitesse existent quand même, sans être visibles sur le régulateur.

Telle est la théorie des perturbations du premier genre. Pour fixer les idées et pour bien faire comprendre comment elles peuvent être évitées par un calcul convenable du volant, nous allons faire deux explications numériques.

§ 13. — **Applications.** — Je suppose, d'abord, qu'il s'agisse d'une machine Corliss à un seul cylindre, la vapeur étant admise à 8 atmosphères dans les cylindres avec 20 p. 100 d'admission et avec condensation. Je suppose la bielle assez longue pour pouvoir être considérée comme infinie. La *fig.* 1 (Pl. VIII) représente à une échelle réduite le travail indiqué sur le piston. La *fig.* 2 représente le chemin parcouru par le bouton de la manivelle pendant



une demi-révolution du volant. Je partage cette demi-circonférence en huit parties égales et je numérote de 0 à 8 les divisions ainsi obtenues. Je me propose de construire sur la *fig.* 3 la courbe des moments des efforts résistants comme à la *fig.* 8 de la Pl. VIII. Je vais construire la courbe des moments des efforts moteurs par points, en évaluant les points de cette courbe correspondant aux points 0, 1, 2, ..., 8, de la demi-circonférence décrite par la manivelle. Pour cela, j'abaisse des perpendiculaires (*fig.* 2) de chacun des points 1, 2,..., 7, de la circonférence sur le diamètre ; puis, je reporte les points projetés sur l'abscisse de la *fig.* 1. On a ainsi les positions du piston 0,1, 2,..., 8, qui correspondent aux points 0, 1, 2,..., 8, considérés de la circonférence décrite par la manivelle ; puis, j'élève des perpendiculaires en ces points jusqu'à leur rencontre avec la courbe des efforts dans le cylindre *fig.* 1.

Il est évident que, en un point donné, le point 3 par exemple, de la circonférence de la manivelle, le moment de l'effort moteur est égal au produit EF (*fig.* 1) de l'effort du piston, par la distance CD (*fig.* 2) qui représente la longueur de la perpendiculaire abaissée de l'axe du volant sur la direction de la bielle, direction parallèle à AB, puisque la bielle est supposée infinie.

Sur la *fig.* 3 nous avons construit la courbe des efforts moteurs du piston et la courbe des distances à l'axe. La courbe cherchée des moments des efforts moteurs est obtenue en faisant point par point le produit des ordonnées de ces deux courbes. On obtient ainsi la courbe OMGNH. Je prolonge cette courbe, pareille, pendant un autre quart de révolution du volant suivant HPIJ.

La courbe des moments des efforts résistants est une ligne droite horizontale, le travail résistant étant supposé constant ; le régime étant permanent, le travail résistant est égal au travail moteur ; il en résulte que la position

de la droite horizontale KL, qui représente le moment du travail résistant, est déterminée par la condition que la surface OMGNH est égale à la surface rectangulaire OKLH.

Les surfaces ombrées MGN et NHP sont alors égales ; c'est leur valeur qui va me servir pour calculer le volant, comme on va le voir.

Comme on l'a vu, nous n'avons jamais fait intervenir la longueur de la course du piston en unités définies, ni la surface du piston ; c'est inutile, car, pour terminer, nous évaluerons la surface MGN, non pas en valeur absolue, mais en fonction du double de la surface totale OMGNH, c'est-à-dire en fonction du travail moteur pendant une révolution complète du volant.

Je suppose que la surface MGN représente une fraction décimale $0$ de cette valeur. Dans le cas de la *fig.* 3 (Pl. VIII), cette fraction est égale à $\frac{15}{100}$, soit donc $0 = 0{,}15$.

Pour calculer le volant, reprenons la formule du paragraphe précédent :

$$\frac{I}{2}(\omega^2_n - \omega^2_m) = S,$$

qui devient ici :

$$\frac{I}{2}[(\omega'')^2 - (\omega')^2] = S,$$

S étant la surface de MGN de la *fig.* 3.

Je désigne par V la vitesse de la jante du volant évaluée à sa circonférence moyenne, passant par le centre de gravité de la section de cette jante. Je désigne par M la masse de la jante du volant. On peut négliger la force vive des bras du volant, parce qu'ils ont un faible poids, eu égard à celui de la jante, et aussi parce que leur vitesse est moindre ; du reste, ce petit supplément de



force vive, dont je ne tiens pas compte, vient en compensation de l'irrégularité causée par le mouvement de va-et-vient des bielles, pistons, etc...

Il résulte de ce qui précède que $\frac{I}{2}\omega^2$ peut se remplacer par $\frac{1}{2}MV^2$.

Je ne tiens pas compte de la force vive des transmissions de l'atelier ; il conviendrait cependant d'en tenir compte, si elle était considérable ; dans ce cas, on pourrait réduire le poids du volant, qui résulte des théories qui vont suivre.

A l'avenir, je représenterai toujours la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par $\frac{1}{2}MV^2$ pour le motif qui précède, et avec cette seule réserve qu'il faut y comprendre la $\frac{1}{2}$ force vive des transmissions, si elle est notable.

La formule précédente peut donc s'écrire :

$$\frac{1}{2}M(V''^2 - V'^2) = S = 0 \times T$$

(en désignant par $V''$ la plus grande vitesse, et par $V'$ la plus petite ; $0$ a été défini ci-dessus et T représente le travail moteur total en kilogrammètres, pendant une révolution du volant).

Soient $\Phi$ la force en chevaux de la machine, et N le nombre de révolutions du volant par minute ; on a :

$$\Phi = \frac{T \times N}{75 \times 60}, \qquad \text{d'où :} \qquad T = \frac{75 \times 60}{N} \times \Phi.$$

On a donc, en remplaçant T par sa valeur :

$$\frac{1}{2}M(V''^2 - V'^2) = 0 \times \frac{75 \times 50}{N} \times \Phi.$$

Le premier nombre peut s'écrire ainsi :

$$\frac{1}{2} M (V'' - V') (V'' + V') = 0 \frac{75 \times 60}{N} \times \Phi.$$

Divisons et multiplions par $\frac{V'' + V'}{2}$ le premier membre on a :

$$\frac{1}{2} M \frac{V'' + V'}{\frac{V'' + V'}{2}} (V'' + V') \frac{V'' + V'}{2} = 0 \times \frac{75 \times 60}{N} \times \Phi.$$

Or, $\frac{V'' - V'}{\frac{V'' + V'}{2}}$ n'est autre chose que l'écart relatif de vitesse du volant ; désignons-le par $\varepsilon$ ; d'autre part, $V'' + V'$ peut se confondre avec 2W, en appelant W la vitesse moyenne de régime de la jante du volant ; substituons, il vient :

$$\frac{1}{2} M \times \varepsilon \times 2W \times W = 0 \times \frac{75 \times 60}{N} \times \Phi,$$

ou bien :

$$\frac{1}{2} MW^2 \varepsilon = 0 \times \frac{75 \times 60}{2N} \times \Phi = 0 \times 37{,}5 \times \frac{60}{N} \times \Phi;$$

d'où l'on tire :

$$\frac{\frac{1}{2} MW^2}{\Phi} = 37{,}5 \times 0 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{\varepsilon}.$$

Telle est la valeur de la $\frac{1}{2}$ force vive du volant, en kilogrammètres par cheval de force motrice pour obtenir un écart relatif de vitesse du volant égal à $\varepsilon$.

Si nous appliquons au cas de la *fig.* 3 (Pl. VIII), on trouve que 0 a la valeur 0,15, c'est-à-dire que la surface MGN représente 15 p. 100 du travail moteur total d'une révolution complète.



On trouve alors :

$$\frac{\frac{1}{2} MW^2}{\Phi} = 37{,}5 \times 0{,}15 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{\varepsilon} = 5{,}6 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{\varepsilon}.$$

Je prendrai comme deuxième application une machine Corliss à deux cylindres calés à 90°, à condensation, avec admission à 20 p. 100 de vapeur, à 8 atmosphères et en supposant les bielles infinies.

En opérant de la même façon que ci-dessus, on trouve $0 = 0{,}026$ et :

$$\frac{\frac{1}{2} MW^2}{\Phi} = 37{,}5 \times 0{,}026 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{\varepsilon} = 0{,}97 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{\varepsilon}.$$

§ 14. — Remarques. — Dans les deux applications précédentes, j'ai supposé le travail résistant constant pendant l'intervalle d'une révolution, ce qui ne l'empêche pas de subir des variations très grandes de temps en temps, mais en restant constant ensuite.

J'ai supposé, en outre, que, pendant chaque tour du volant, et même pendant une fraction de tour, le travail moteur était égal au travail résistant. Il y a des cas où les choses se passent autrement, par exemple dans les machines conduisant un laminoir ; dans ce cas le travail résistant pendant un tour du volant est de beaucoup inférieur au travail moteur, à un tel point que le volant ralentit très sensiblement pendant le travail du laminoir. Dans ce cas il ne peut être question de mettre un régulateur de précision à la machine ; on dispose alors un régulateur réglé pour une vitesse supérieure à la vitesse normale, et agissant sur une valve ; c'est alors un simple modérateur de vitesse destiné à empêcher une augmentation de vitesse pouvant amener l'explosion du volant. Un tel appareil étant très facile à installer, nous n'insisterons pas davantage.

Dans les deux applications numériques, nous avons supposé la bielle assez longue pour être supposée infinie ; avec des bielles de dimensions courantes, l'épure serait un peu plus compliquée, quoique toujours d'après les mêmes principes ; c'est pourquoi je crois inutile de la donner ici ; on trouverait pour le volant des valeurs plus fortes de $\frac{1}{5}$ environ que celles que nous venons de trouver.

## III. — Théorie des perturbations du deuxième genre de la position du manchon du régulateur.

(Cette théorie est entièrement nouvelle ; elle est exposée aux § 15 à 22 suivants ; je l'ai imaginée à la suite des recherches que j'ai faites depuis 1887, et pour répondre à la question posée par l'Académie.)

§ 15. — **Définitions des perturbations du deuxième genre.** — Lorsque le manchon du régulateur se déplace un peu rapidement pour passer d'une position à une autre, il dépasse généralement sa nouvelle position d'équilibre en vertu de la force vive de toutes les pièces du régulateur ; il ne s'agit pas de la force vive de rotation du régulateur autour de son axe vertical, mais de la force vive verticale de la surcharge du manchon et de la force vive correspondante des boules, comme on le verra plus loin ; si la position d'équilibre du manchon a été notablement dépassée, il peut y revenir rapidement en la dépassant encore beaucoup en sens inverse ; il se peut que ces oscillations cessent rapidement ou qu'elles durent indéfiniment. Telles sont les perturbations du deuxième genre de la position du manchon. Elles ont été signalées par plusieurs savants et ingénieurs. Je citerai d'abord le regretté M. Rolland, membre de l'Institut, qui a signalé ces perturbations sans donner le calcul de la relation qui doit



exister entre le régulateur et le volant pour les éviter (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 20 mai 1867, 8 janvier 1872 et 14 août 1876) ; puis, M. Worms de Romilly, Ingénieur en chef des Mines, qui a publié une étude intéressante à ce sujet (*Annales des Mines*, 7e série, t. I). Dans cette étude, M. Worms de Romilly a montré que les régulateurs pouvaient être sujets à des oscillations fâcheuses, mais il n'a pas donné de formules permettant de calculer la corrélation qui doit exister entre le volant et le régulateur.

D'autre part, M. Résal, membre de l'Institut, a donné, depuis longtemps, l'équation générale du mouvement d'une machine, quand la résistance varie ; mais il a montré qu'elle conduisait à des calculs inextricables.

La voie suivie jusqu'à présent ne pouvant conduire à la solution de la question, j'y suis arrivé moi-même en prenant comme point de départ la théorie ci-dessus des régulateurs à maximum et minimum. Comme on va le voir, la théorie qui va suivre me permet d'établir la corrélation qui doit exister entre le régulateur, les organes de réglage et le volant, pour éviter l'influence fâcheuse des perturbations du deuxième genre, et cela en me basant sur des calculs purement théoriques, sans m'appuyer sur l'expérience ni l'observation.

La théorie nouvelle qui va suivre a une grande importance, parce que, comme on le verra au § 36, les perturbations du deuxième genre sont celles qui sont le plus à redouter dans la majorité des cas ; on verra plus loin que ma théorie s'applique, non seulement au cas des machines Corliss, mais encore au cas des régulateurs à valve, et même aux régulateurs de pression et autres. En résumé, nous sommes arrivés au point le plus important du mémoire.

§ 16. — **Évaluation de la vitesse maxima du manchon du régulateur.** — Nous allons d'abord évaluer la vitesse du

manchon du régulateur dans le cas le plus défavorable, et nous verrons ensuite comment la demi-force vive verticale du régulateur peut être amortie par les frottements ou le frein à huile.

A première vue, on pourrait chercher à calculer exactement la vitesse de déplacement du manchon du régulateur au moyen des formules de la première partie. Désignons par $l$ la distance variable du manchon au sommet du régulateur ; les formules de la première partie sont de la forme $l = f(\omega)$, $f$ désignant une fonction, et $\omega$ désignant la vitesse angulaire du régulateur et du volant. On pourrait donc avoir la vitesse de déplacement du manchon en prenant la dérivée de $l$ par rapport au temps. En outre, la courbe définie dans le § 12 permet de calculer la vitesse du volant, à chaque instant, d'après les variations du travail moteur et du travail résistant ; mais la difficulté tient à ce que, à mesure que le manchon se déplace, le travail moteur change et fait varier $\omega$ en même temps ; la question se complique alors d'une façon telle qu'on ne peut venir à bout de la résoudre. Mais je vais employer une nouvelle méthode qui permet de résoudre autrement le problème.

La méthode consiste à adopter, comme vitesse du manchon, celle qui se produit dans les conditions les plus défavorables au point de vue qui nous occupe.

Je suppose que le manchon du régulateur passe de sa position inférieure à sa position supérieure en une seule oscillation ; il s'agit là d'une oscillation dont la durée n'a aucun rapport avec la durée d'une révolution du volant, contrairement à ce qui se passe dans les perturbations du premier genre. Je suppose que, pendant toute la durée de cette oscillation, le travail moteur soit égal à son maximum, et que le travail résistant soit égal à zéro ; je suppose d'abord le travail moteur constant dans l'intervalle de chaque révolution du volant.



Soient M la masse *de la jante* du volant et V sa vitesse, la $\frac{1}{2}$ force vive de la jante du volant est $\frac{1}{2}MV^2$ ; celle du volant entier, ou $\frac{I}{2}\omega^2$, est un peu supérieure, mais je prendrai celle de la jante comme représentant celle du volant pour les motifs indiqués au § 13.

Soient $V_1$ et $V_2$ les valeurs extrêmes de V correspondant aux valeurs extrêmes $\omega_1$ et $\omega_2$ de la vitesse angulaire, ou aux positions extrêmes du manchon du régulateur.

Je désigne par T le travail moteur maximum par seconde évalué en kilogrammètres. Soit $x$ le temps inconnu que va mettre le manchon pour passer de sa position inférieure à sa position supérieure ; on a :

$$\frac{1}{2}MV^2_2 - \frac{1}{2}MV^2_1 = T \times x.$$

Or, $T = \Phi \times 75$, en appelant $\Phi$ la force en chevaux maxima de la machine ; on a donc :

$$\frac{1}{2}MV^2_2 - \frac{1}{2}MV^2_1 = \Phi \times 75 \times x,$$

ou bien :

$$\frac{1}{2}M(V^2_2 - V^2_1) = \Phi \times 75 \times x.$$

Or, le premier membre peut s'écrire :

$$\frac{1}{2}M(V_2 - V_1)(V_2 + V_1).$$

Divisons et multiplions par $\frac{V_2 + V_1}{2}$.

On peut écrire le premier membre :

$$\frac{1}{2}M\frac{V_2 - V_1}{\frac{V_2 + V_1}{2}}(V_2 + V_1)\frac{V_2 + V_1}{2}.$$

Soit W la vitesse de régime de la jante, on a : $W = \frac{V_2 + V_1}{2}$ ; substituons, le premier membre devient :

$$\frac{1}{2} M \frac{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}{2} \times 2W^2.$$

L'équation s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} M \frac{\frac{V_2 - V_1}{\left(\frac{V_2 + V_1}{2}\right)}}{} \times 2W^2 = \Phi \times 75 \times x.$$

Or :

$$\frac{\frac{V_2 - V_1}{\left(\frac{V_2 + V_1}{2}\right)}}{} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}} = E.$$

On a donc :

$$\frac{1}{2} ME \times 2W^2 = \Phi \times 75 \times x,$$

E désignant comme d'habitude l'écart relatif de vitesse du régulateur. On en tire :

$$x = \frac{\frac{1}{2} MW^2 \times 2E}{\Phi \times 75} = \frac{\frac{1}{2} MW^2}{\Phi} \times \frac{2E}{75}.$$

Connaissant le temps $x$ que met le manchon à passer d'une de ses positions extrêmes à l'autre et la course du manchon, que je désignerai par $c$, la vitesse correspondante du manchon est égale à $\frac{c}{x}$, $x$ étant donné par la formule précédente.

Comme on le voit, cette formule, qui donne la vitesse maxima du manchon, ne fait intervenir ni le nombre de tours de la machine, ni le nombre de cylindres, ni le genre compound ou non ; elle ne dépend que de E et de



la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval de puissance maxima de la machine.

Pour que $\frac{c}{x}$ représente rigoureusement la vitesse maxima du manchon, il faut encore montrer que cette vitesse du manchon est sensiblement uniforme pendant le mouvement du manchon que nous venons de considérer ; $\frac{c}{x}$ représente, en effet, la vitesse moyenne d'ascension du manchon quand sa vitesse est maxima ; elle sera en même temps *vitesse maxima*, si cette vitesse est uniforme.

Pour montrer que cette vitesse est sensiblement uniforme, revenons aux formules de la première partie qui donnent la distance du manchon au sommet du régulateur ou $l$ en fonction de la vitesse angulaire $\omega$ de rotation du régulateur ou du volant.

On a donc pour le régulateur de Watt et de Porter par exemple :

$$L = \frac{C^{te}}{\omega^2}$$

(la constante ne dépendant pas de $\omega$).

Voyons maintenant comment $\omega$, ou vitesse angulaire du volant, varie avec le temps $t$ depuis le moment où commence l'ascension du manchon dans les conditions considérées. Nous avons supposé que le travail moteur était maximum, et le travail résistant nul. Pendant ce temps, le volant prendra naturellement un mouvement uniformément accéléré ; on a donc : $\omega = A + Bt$ (A et B étant des constantes, et $t$ le temps depuis l'origine).

Donc on a : $l = \frac{C^{te}}{(A + Bt)^2}$.

Cela posé, il est évident que la vitesse du manchon à un moment quelconque est égale à $\frac{dl}{dt}$.

Pour différentier l'équation précédente posons :

$$(A + Bt) = u;$$

on a :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{dl}{du} \times \frac{du}{dt}$$ (différentielle d'une fonction de fonction).

Or :

$$\frac{dl}{du} = d\left(\frac{C^{te}}{u^2}\right) = d\,(C^{te}\,u^{-2}) = -\,2C^{te}\,u^{-3},$$

d'autre part :

$$\frac{du}{dt} = d\,(A + Bt) = B.$$

Donc :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{dl}{du} \times \frac{du}{dt} = (-\,2C^{te}\,u^{-3}) \times B = -\,2BC^{te}\,(A + Bt)^{-3}$$

$$\frac{dl}{dt} = -\,\frac{2BC^{te}}{(A + Bt)^3} = \frac{-C'}{\omega^3},$$

C′ désignant une autre constante, et ω la vitesse angulaire du volant. On voit donc que la vitesse du manchon est proportionnelle à l'inverse du cube de la vitesse angulaire du volant. La vitesse maxima du manchon aura donc lieu quand ω aura la plus faible valeur, c'est-à-dire en partant.

Si l'on considérait l'oscillation inverse du manchon, se produisant quand le travail moteur est nul et le travail résistant égal à son maximum, on arriverait à la même formule au signe près :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{+C'}{\omega^3}.$$

Dans ce cas, la vitesse maxima du manchon a lieu à la fin de sa chute.

Évaluons maintenant de combien cette vitesse maxima du manchon diffère de sa vitesse moyenne de chute.



Si Ω est la vitesse angulaire de régime du manchon, on a à la fin de la chute $\omega = \Omega\left(1 - \frac{E}{2}\right)$.

Donc la vitesse maxima du manchon est égale à :

$$\frac{C'}{\Omega^3\left(1 - \frac{E}{2}\right)^3}.$$

Donc le maximum véritable de la vitesse est égal à la vitesse moyenne $\frac{c}{x}$ que nous avons considérée $\times \frac{1}{\left(1 - \frac{E}{2}\right)^3}$.

En réalité, ce facteur est sensiblement égal à 1, de sorte que la vitesse $\frac{c}{x}$ peut être considérée comme uniforme.

Donc $\frac{c}{x}$ représente bien le maximum de la vitesse du manchon, quoi qu'il arrive, ce qu'il fallait démontrer.

J'ai supposé que le travail moteur était égal à son maximum et qu'il pouvait être considéré comme constant dans l'intervalle d'une révolution. En réalité, comme l'indique la *fig.* 3 (Pl. VIII), il atteint momentanément une valeur sensiblement supérieure à sa valeur moyenne, pendant un instant très court ; cela ferait supposer que la vitesse du manchon peut atteindre une valeur supérieure à celle que nous venons de calculer, mais il n'en est rien : 1° parce que l'instant en question est très court, ce qui ne permet pas au manchon de se lancer ; 2° parce que nous avons supposé que le travail résistant tombait à zéro, tandis qu'en réalité il ne tombe guère, en pratique, au-dessous de 1/4 de son maximum, à cause des résistances passives de la machine et de l'atelier. Il en résulte donc que la vitesse du manchon ne dépassera jamais celle que nous venons de calculer.

Il est essentiel de se rappeler que Φ représente la force motrice maxima de la machine en chevaux, quand elle

fonctionne avec le maximum de l'admission compatible avec la distribution et son mode de liaison avec le régulateur.

§ 17. — **Principe de la théorie des perturbations du deuxième genre.** — Nous allons voir maintenant comment la $\frac{1}{2}$ force vive verticale du manchon et la $\frac{1}{2}$ force vive correspondante des boules vont être amorties par les frottements et par le frein à huile, et nous en conclurons la manière de calculer le régulateur, les organes de réglage, le volant et leur corrélation, de telle façon que les perturbations du deuxième genre n'aient aucun effet fâcheux sur le fonctionnement du régulateur et de la machine. Reprenons la formule précédente du § 16 :

$$x = \frac{\frac{1}{2}MW^2}{\Phi} \times \frac{2E}{75}.$$

Je désigne $\frac{\frac{1}{2}MW^2}{\Phi}$ par $y$ ; c'est la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval de force motrice maxima de la machine ; $y$ est la principale inconnue du problème ; il s'agit de déterminer $y$ de telle façon que la $\frac{1}{2}$ force vive verticale du manchon du régulateur et la $\frac{1}{2}$ force vive correspondante des boules soient amorties suffisamment vite par les frottements ou le frein à huile ; la détermination de la puissance du frein est une autre inconnue à déterminer.

Je suppose d'abord que le frein ne soit pas un frein à huile, mais un frottement quelconque constant, indépendant de la vitesse du manchon, et ayant une valeur F évaluée au manchon. Le frottement des axes, des bielles



et leviers du régulateur, peut remplir ce rôle de frein, s'il est assez important.

Nous avons dit que la vitesse maxima du manchon est égale à $\frac{c}{x}$, $c$ étant la course totale du manchon; l'équation ci-dessous peut s'écrire :

(1) $$x = y \times \frac{2E}{75}, \qquad \text{ou:} \qquad y = x \times \frac{75}{2E}.$$

J'appellerai à l'avenir $\frac{1}{2}$ force vive *axiale* du régulateur la $\frac{1}{2}$ force vive que possède l'ensemble du régulateur dans le sens de l'axe du régulateur, quand le manchon se déplace ; c'est cette demi-force vive qu'il faut amortir avec le frein. Je vais maintenant en calculer la valeur.

Définissons et évaluons à présent cette $\frac{1}{2}$ force vive axiale du régulateur, d'abord dans le cas du régulateur de Watt et de Farcot ordinaire, ensuite dans le cas où le poids des boules est négligeable par rapport au poids de la surcharge du manchon, comme dans les régulateurs divers du genre de Porter.

En ce qui concerne le poids Q du manchon avec sa surcharge, la $\frac{1}{2}$ force vive axiale est celle qui est due à la masse $\frac{Q}{g}$ et à la vitesse maxima du manchon ; voyons maintenant quelle est la part des boules dans la $\frac{1}{2}$ force vive axiale du régulateur entier.

Considérons d'abord une boule M de poids P, animée dans l'espace d'un mouvement rectiligne et d'une vitesse représentée par la longueur et la direction V (*fig.* 2, pl. IX) ; la $\frac{1}{2}$ force vive de cette boule $= \frac{1}{2}\frac{P}{g}V^2$.

Décomposons la vitesse V suivant deux composantes $V_1$ et $V_2$, suivant deux axes perpendiculaires et arbitraires situés dans le même plan que la vitesse V ; en vertu du théorème du carré de l'hypoténuse, on a la relation :

$$V^2 = V^2_1 + V^2_2,$$

ou bien :

$$\frac{1}{2}\frac{P}{g}V^2 = \frac{1}{2}\frac{P}{g}V_1^2 + \frac{1}{2}\frac{P}{g}V^2_2.$$

Donc on peut dire que la demi-force vive de la boule suivant la direction de sa vitesse réelle est égale à la somme des $\frac{1}{2}$ forces vives de la même masse et avec deux vitesses égales aux composantes de la vitesse réelle.

On peut appliquer ce principe au cas d'une boule de régulateur à force centrifuge considérée pendant que le régulateur tourne et que le manchon s'abaisse en même temps. Dans ce cas, la vitesse de chaque boule est une vitesse de direction inclinée qui va en s'abaissant très légèrement ; on peut, suivant le principe précédent, décomposer cette vitesse en deux (*fig.* 4, Pl. IX) : l'une $V_2$ est horizontale et perpendiculaire en C au plan O'OC ; elle n'est pas représentée sur la *fig.* 4; l'autre $V_1$ est tangente en C à la circonférence décrite par la boule autour de O.

Il résulte alors du principe précédent qu'on peut remplacer la $\frac{1}{2}$ force vive $\frac{1}{2}\frac{P}{g}V^2$ de la boule par les $\frac{1}{2}$ forces vives de la même masse $\frac{P}{g}$ et des deux vitesses composantes ci-dessus.

La composante $\frac{1}{2}\frac{P}{g}V_2^2$ de la vitesse horizontale n'a pas d'influence dans le cas qui nous occupe ; elle sert à faire remplir au régulateur le rôle de petit volant s'ajoutant à l'action du grand volant de la machine,



rôle très minime d'ailleurs ; mais la composante $\frac{1}{2}\frac{P}{g}V_1^2$ est une $\frac{1}{2}$ force vive qui s'ajoute à la $\frac{1}{2}$ force vive verticale du manchon pour lui donner une tendance à dépasser sa position d'équilibre, lorsqu'il s'est déplacé un peu vite.

En résumé, ce que j'appelle la $\frac{1}{2}$ force vive *axiale* du régulateur donnant lieu aux perturbations du deuxième genre est la somme de la $\frac{1}{2}$ force vive verticale du manchon et de la $\frac{1}{2}$ force vive $\frac{1}{2}\frac{P}{g}V_1^2$ définie ci-dessus et comptée autant de fois qu'il y a de boules.

Cela posé, je vais établir une équation pour représenter ce fait que la $\frac{1}{2}$ force vive axiale de l'ensemble du régulateur soit détruite par l'action d'un frottement F sur une longueur $\lambda c$, $\lambda c$ étant une fonction de la course $c$ du manchon, aussi petite qu'on veut.

§ 18. — **Cas du régulateur de Porter.** — Examinons d'abord le cas des régulateurs genre Porter, dans lesquels P est négligeable par rapport à Q ; dans ce cas, la composante $\frac{1}{2}\frac{P}{g}V_1^2$ est négligeable par rapport à la $\frac{1}{2}$ force vive du manchon; l'équation devient donc tout simplement :

$$\frac{1}{2}\frac{Q}{g}\left(\frac{c}{x}\right)^2 = F \times \lambda c. \qquad (2)$$

D'autre part, on a vu au § 1 que la perturbation relative de vitesse $\frac{dn}{n}$ due à F était donnée par la formule :

$$\frac{dn}{n} = \frac{F}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)}.$$

Or, dans le régulateur de Porter, P peut être négligé par rapport à Q; $\frac{Pb}{a} + Q$ peut donc être remplacé par Q. Mais il ne suffit pas que la $\frac{1}{2}$ force vive axiale du régulateur soit amortie sur une fraction $\lambda c$ très petite de la course du manchon; ce serait toujours facile à obtenir avec un frein puissant; il faut encore que ce frein, par sa puissance même, ne trouble pas sensiblement la marche du régulateur; pour cela, il faut que la perturbation relative de vitesse $\frac{dn}{n}$ due au frein F soit une fraction donnée $\mu$ de l'écart relatif de vitesse du régulateur, ou $\frac{dn}{n} = \mu \times E$; substituons, il vient :

$$\mu \times E = \frac{F}{2Q}. \tag{3}$$

Les équations (1), (2), (3) ont trois inconnues $x$, $y$, F, qu'il est facile de déterminer; alors $y$ sera connu, et le problème sera résolu.

De (3) on tire : $F = 2Q\mu E$.

Substituons dans (2); il vient :

$$\frac{1}{2}\frac{Q}{g}\frac{c^2}{x^2} = 2Q\mu E\lambda c,$$

ou bien :

$$\frac{c}{gx^2} = 4\lambda\mu E, \quad \text{ou :} \quad c = 4g\lambda\mu E x^2,$$

ou :

$$x^2 = \frac{c}{4g\lambda\mu E}, \qquad \text{d'où :} \qquad x = \sqrt{\frac{1}{4g}}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E}}.$$

Reprenons l'équation $y = x \times \frac{75}{2E}$ du paragraphe précédent et remplaçons dans cette équation $x$ par sa valeur :

$$y = \sqrt{\frac{1}{4g}}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E}} \times \frac{75}{2E} = \frac{75}{4}\sqrt{\frac{1}{g}}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}.$$



Telle est l'équation qui donne la demi-force vive du volant par cheval de puissance maxima de la machine, à la vitesse normale de régime; elle permet de calculer le poids du volant.

En prenant pour unités, comme dans tout le mémoire, le mètre, le kilogramme et la seconde, et remplaçant $y$ par sa valeur, l'équation devient :

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}. \tag{4}$$

Telle est ma nouvelle formule générale de la corrélation; elle donne la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval en fonction de l'écart relatif de vitesse E du régulateur qu'on s'est donné suivant la régularité qu'on désire obtenir; plus les fractions $\lambda$ et $\mu$ seront choisies petites, et plus les perturbations du deuxième genre seront insensibles. La vitesse maxima du manchon qui a servi de base à tous ces calculs correspond, ne l'oublions pas, à l'hypothèse la plus défavorable qui puisse se présenter. Faisons $\lambda = 0{,}25$ et $\mu = 0{,}33$ par exemple; on voit alors que le frein arrêtera le manchon sur une longueur égale à $\frac{1}{4}$ de la course du manchon, dans cette hypothèse très défavorable. Cherchons maintenant à étudier de plus près la perturbation du manchon. Si le travail résistant tombait à zéro réellement, le manchon sauterait de toute sa course dans la première oscillation, puisque $x$ a été justement calculé pour cela. Mais, en réalité, nous avons fait remarquer que le travail résistant ne descend jamais au-dessous de $\frac{1}{4}$ de son maximum, à cause des résistances passives de la machine et de l'atelier. Donc la nouvelle position d'équilibre du manchon sera à $\frac{1}{4}$ de la course à partir du haut,

ou $\frac{3}{4}$ à partir du bas ; cette position sera dépassée, à cause de l'élan, d'une longueur égale à $\frac{1}{4}$ de la course, en supposant $\lambda = 0{,}25$. Donc le manchon arrivera juste en haut de sa course une fois la première oscillation arrêtée par le frein. Nous avons dit que les valeurs de $\lambda = 0{,}25$ et $\mu = 0{,}33$ étaient convenables pour la pratique. Il ne faudrait pas choisir pour ces coefficients des valeurs trop supérieures à ces chiffres : on s'exposerait d'abord à une première oscillation trop brusque du manchon ; ensuite, les oscillations qui suivent la première, au lieu d'aller en diminuant rapidement, pourraient durer indéfiniment.

Si la vitesse du manchon dans une perturbation n'était égale qu'à la moitié du maximum que nous avons calculé, ce qui est le cas de la pratique courante, le manchon aurait une $\frac{1}{2}$ force vive quatre fois plus faible ; il serait donc arrêté par le frein sur une longueur quatre fois plus faible ou $\frac{1}{16}$ de la course du manchon, longueur insignifiante.

Dans toute la théorie qui précède, j'ai considéré l'hypothèse la plus défavorable, dans laquelle le travail résistant est nul et le travail moteur maximum pendant tout le temps que le manchon passe de sa position inférieure à sa position supérieure ; il y a encore une autre hypothèse aussi défavorable ; c'est celle dans laquelle le travail moteur est supposé nul et le travail résistant maximum pendant tout le temps que le manchon passe de sa position supérieure à sa position inférieure. Cette hypothèse donne naturellement lieu aux mêmes calculs, aux mêmes formules et aux mêmes observations, de sorte qu'il est inutile de s'y arrêter plus longtemps.

Revenons maintenant à la formule (4) ci-dessus, et terminons le calcul.



La puissance du frein est donnée par la formule (3), ou :

$$\frac{F}{Q} = 2\mu E. \tag{5}$$

Il est essentiel de remarquer que cette formule donne la valeur du frein F en fonction de Q ; la valeur *absolue* de Q, ainsi que celle de F, se calcule d'après les perturbations du troisième genre, comme on le verra aux § 25 et suivants.

Faisons une explication numérique de la formule (4) :

$$\lambda = 0{,}25, \quad \mu = 0{,}33, \quad E = 0{,}05, \quad \text{et :} \quad c = 0^{m},06.$$

On a :

$$y = 6\sqrt{\frac{0{,}06}{0{,}25 \times 0{,}33 \times (0{,}05)^3}} = 458.$$

Donc il faut une demi-force vive du volant par cheval égale à 458 kilogrammètres pour que $\lambda$ ne soit égal qu'à 0,25 et $\mu$ égal à 0,33.

Ce chiffre de 458 n'est pas exagéré ; on verra, § 36, qu'il est analogue à celui qu'on adopte généralement dans les machines bien réglées ; cette remarque est très importante ; on pourrait supposer, en effet, que ma théorie a une tendance à donner des chiffres un peu forts pour le poids du volant, puisque cette théorie a pour point de départ l'hypothèse la plus défavorable ; on voit qu'il n'en est rien, et qu'elle donne une valeur du volant tout à fait modérée ; on verra même plus loin comment, avec des régulateurs à poids et à ressorts, j'arrive à montrer qu'on peut employer des volants moindres que ceux qu'on emploie habituellement, en donnant cependant à la machine une régularité de marche meilleure que celle qui a été obtenue jusqu'à ce jour.

Nous avons supposé que F représentait un frottement constant indépendant de la vitesse du manchon. Le frein

à huile donne une valeur de F variable et proportionnelle au carré de la vitesse de déplacement du manchon ; pour qu'il arrête le manchon sur une même longueur de course que l'effort F, il faut qu'il donne au début une résistance supérieure à F, résistance qui va en décroissant jusqu'à zéro. Sa puissance devra être telle qu'il offre un même travail résistant total que la valeur $F \times \lambda c$ avec le même chemin parcouru $\lambda c$. Il y aura donc, au début, une perturbation relative de vitesse un peu supérieure à celle qui entre dans les calculs précédents ; mais peu importe, puisque l'effet du frein à huile va en décroissant à mesure que la vitesse du manchon diminue ; le manchon ne sera alors plus du tout troublé par le frein à huile lorsque le manchon se rapprochera de sa position d'équilibre, et l'oscillation s'arrêtera ; le frein à huile est donc encore plus favorable que le frein constant F.

Au premier abord, on peut trouver que j'ai choisi pour les fractions $\lambda$ et $\mu$ une valeur un peu forte en les prenant égales à 0,25 et 0,33, mais il n'en est rien, car il ne faut pas oublier que je me suis placé dans l'hypothèse la plus défavorable, qui ne se réalise presque jamais. Cependant je ne conseillerai pas de prendre ces valeurs de 0,25 et 0,33 dans tous les cas possibles ; c'est une moyenne : on peut prendre un peu moins ou un peu plus, suivant que les variations du travail résistant de l'atelier doivent être plus ou moins grandes.

Je ne saurais trop répéter que, quand je parle de la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval, il s'agit de la force en chevaux *maxima* de la machine correspondant à la position inférieure du manchon du régulateur. Cela montre qu'il faut avoir bien soin de régler cette force motrice maxima en rapport avec l'atelier, sans qu'elle soit trop supérieure au maximum du travail résistant évalué en chevaux ; sans cela la formule (4) obligerait à donner au volant un poids



exagéré. J'insiste sur cette remarque, car elle est destinée à changer les habitudes de certains constructeurs de machines Corliss ; la pratique leur a déjà montré, d'ailleurs, depuis quelques années, qu'il est mauvais de donner une trop grande valeur au maximum de la force en chevaux ; cette habitude fâcheuse a donné de véritables insuccès dans la régularisation, en exposant le régulateur à des oscillations lentes déplorables dans la pratique.

§ 19. — **Cas des régulateurs de Watt et de Farcot.** — S'il s'agissait, non plus d'un régulateur de Porter, mais d'un régulateur de Watt et de Farcot, alors P ne serait plus négligeable par rapport à Q ; dans ce cas, nous allons reprendre la même théorie en suivant le même plan.

Dans ce cas, l'équation (1) subsiste, ou :

$$y = x \times \frac{75}{2E}. \qquad (1)$$

L'équation (2) a la même forme qu'au paragraphe précédent, mais il faut tenir compte, non seulement de la $\frac{1}{2}$ force vive axiale du manchon du régulateur, mais aussi de la composante $\frac{1}{2}\frac{P}{g} V^2_1$ de la $\frac{1}{2}$ force vive des boules qui a été définie au paragraphe précédent.

Pour cela je désigne par $c'$ le chemin parcouru par une boule sur la circonférence AB (Pl. IX, *fig.* 4) pendant que le manchon parcourt sa course totale $c$ ; quand le manchon prend la vitesse $\frac{c}{x}$, il en résulte que la vitesse considérée de chaque boule est égale à $\frac{c}{x} \times \frac{c'}{c} = \frac{c'}{x}$.

Donc la composante en question de la $\frac{1}{2}$ force vive des

deux boules est :

$$\frac{1}{2} \times \frac{2P}{g} \times \frac{c'^2}{x^2} = \frac{P}{g} \times \frac{c'^2}{x^2}.$$

Donc l'équation (2) du paragraphe précédent devient ici :

$$\frac{1}{2}\frac{Q}{g}\left(\frac{c}{x}\right)^2 + \frac{P}{g}\left(\frac{c'}{x}\right)^2 = F\lambda c. \tag{2}$$

Cette équation est, comme on le voit, basée sur le principe de la décomposition de la $\frac{1}{2}$ force vive des boules, principe exposé au § 18 ; mais ce principe a été établi en supposant que la $\frac{1}{2}$ force vive des boules est arrêtée très vite dans un déplacement élémentaire rectiligne, c'est-à-dire pendant une très petite fraction de révolution du régulateur autour de son axe vertical. Ici, au contraire la $\frac{1}{2}$ force vive axiale n'est arrêtée que pendant une rotation de plusieurs révolutions du régulateur, mais le même principe de décomposition s'applique encore ; en effet, on peut partager la rotation complète en $n$ parties, comprenant chacune une très petite fraction de révolution ; comme le principe de la décomposition s'applique à chacune de ces $n$ parties, il en résulte qu'il s'applique aussi à la totalité.

Passons à l'équation (3) du paragraphe précédent, elle devient ici :

$$\mu E = \frac{F}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)},$$

d'où l'on tire :

$$F = 2\mu E \times \left(P\frac{b}{a} + Q\right).$$



Substituons dans l'équation (2) ci-dessus ; il vient :

$$\frac{1}{2}\frac{Q}{g}\left(\frac{c}{x}\right)^2 + \frac{P}{g}\left(\frac{c'}{x}\right)^2 = 2\lambda\mu Ec\left(P\frac{b}{a} + Q\right).$$

Cette équation peut s'écrire :

$$\frac{1}{2}\left(\frac{c}{x}\right)^2\left[Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right] = 2\lambda\mu Ec\left(P\frac{b}{a} + Q\right);$$

d'où l'on tire :

$$c\left[Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right] = 4gx^2\lambda\mu E\left(P\frac{b}{a} + Q\right);$$

d'où :

$$x^2 = \frac{c}{4g\lambda\mu E} \times \frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q};$$

d'où :

$$x = \sqrt{\frac{c}{4g\lambda\mu E}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{4g}}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}}.$$

Substituons dans l'équation (1) ; il vient :

$$y = x \times \frac{75}{2E} = \frac{75}{4\sqrt{g}}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}},$$

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}} = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{1 + 2\frac{P}{Q}\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{1 + \frac{b}{a}\cdot\frac{P}{Q}}}.$$

Telle est la valeur $y$ de la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par

force de cheval ; elle est de la même forme que la formule (4) du § 18, à part un radical de plus, qui est une fonction très simple des valeurs données :

$$\frac{P}{Q}, \quad \frac{b}{a}, \quad \frac{c'}{c}.$$

Il est assez remarquable de voir que les poids P et Q n'entrent ici que par leur rapport, et non par leur valeur absolue.

§ 20. — **Discussion de la formule de la corrélation.** — Reprenons la formule générale :

$$y = \frac{75}{4\sqrt{g}} \sqrt{\frac{c}{\lambda \mu E^3}} \sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}}.$$

Je vais maintenant montrer quelles conséquences importantes on doit en tirer au point de vue de l'influence de la forme du régulateur sur le poids qu'il faut donner au volant.

Tout d'abord voici quelles sont les conclusions qui résultent du premier radical, ou :

$$\sqrt{\frac{c}{\lambda \mu E^3}}.$$

On voit que la $\frac{1}{2}$ force vive du volant est proportionnelle à la racine carrée de la course du manchon ; il en résulte qu'il faut diminuer cette course autant que possible ; il ne faut cependant pas le faire trop, parce que, dans ce cas, les jeux des pièces articulées nuiraient à la précision ; d'autre part, on verra plus loin que le poids des boules P et du manchon Q, c'est-à-dire la puissance du régulateur, doit être d'autant plus grand que la course





$c$ est plus petite ; pour ces deux motifs, il ne faut donc pas descendre au-dessous d'une certaine limite pour la valeur de $c$.

D'autre part, $y$ est proportionnel à $\frac{1}{\sqrt{E^3}}$ ; il en résulte que le volant doit être d'autant plus fort que l'écart relatif de vitesse E du régulateur est plus faible ; ce fait résulte également des formules des perturbations du premier et du quatrième genres, qui contiennent E en dénominateur. Donc pour trois motifs de la plus haute importance, le volant doit être d'autant plus fort que E est plus petit, et mes formules des perturbations du premier genre, quatrième genre, et surtout du deuxième genre, montrent exactement la relation qui doit exister. C'est là, je le répète, le point capital de ce mémoire. Si E était égal à zéro, c'est-à-dire si le régulateur était isochrone, il faudrait un volant infini. Voilà pourquoi les constructeurs qui ont voulu adopter des régulateurs entièrement isochrones, suivant les théories anciennes, ont entièrement échoué dans la pratique ; ces théories, comme on le voit, n'étudiaient qu'un côté de la question, en négligeant l'importance considérable des perturbations. J'insiste particulièrement sur ce point, parce que l'ancienne méthode est encore enseignée un peu partout, et je crois qu'il y aurait intérêt à modifier cet enseignement.

Poussons maintenant l'étude plus loin et voyons ce qui arriverait si, malgré mes indications, l'on mettait un volant inférieur à celui qui résulte de la formule ci-dessus des perturbations du deuxième genre. Cette formule s'appliquerait encore, mais à condition que $\lambda$ ou $\mu$ fussent plus grands que les chiffres que j'ai indiqués. Dans ce cas, de deux choses l'une : ou bien le régulateur n'aura qu'un frein à huile nul ou faible, ou bien il en aura un puissant.

Dans le premier cas, $\lambda$ sera sensiblement supérieur à 0,25, et même bien supérieur à 1, si le volant est beau-

coup trop faible par rapport à E ; il y aura alors des oscillations rapides et désordonnées du régulateur et de la vitesse de la machine. Dans le deuxième cas, je suppose qu'on mette au régulateur un frein assez puissant pour que la force vive axiale soit amortie pendant une fraction de la course $c$ aussi petite qu'on veut ; autrement dit, $\lambda$ peut encore être inférieur à 1 et rester égal à 0,25, si l'on veut, comme dans l'exemple numérique ci-dessus ; mais alors $\mu$ devra être sensiblement inférieur au chiffre de 0,33 de notre exemple numérique ; il devra même être sensiblement supérieur à l'unité, si le volant est beaucoup trop petit eu égard à la valeur de E ; en d'autres termes, il se produira des oscillations lentes du régulateur et de la vitesse ; les variations de la vitesse seraient d'autant plus grandes que $\mu$ serait plus grand ; la marche de la machine serait déplorable. Cet inconvénient se produit très souvent ; en effet, les constructeurs, suivant les anciens errements, calculent souvent le volant d'après la formule des oscillations du premier genre seulement ; puis, ils choisissent un régulateur à la mode du jour, souvent sensiblement isochrone, qui leur donne une très faible valeur de E ; ils lui adjoignent un frein à huile et ils s'imaginent que, en réglant à la main le frein à huile, ils éviteront les oscillations ; c'est, comme on le voit, une erreur grave, et il faut de toute nécessité se conformer à la relation qui doit exister entre le régulateur, le volant, le frein à huile et la distribution, comme le montrent mes formules.

Comme le radical $\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}$ existe dans la formule avec tous les genres de régulateurs à force centrifuge, ainsi qu'on le verra plus loin, on voit donc que les conclusions importantes qui précèdent s'appliquent à tous les genres de régulateurs connus ou à découvrir.

Examinons maintenant les conséquences qui résultent



du second radical, ou :

$$\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}}.$$

Nous allons chercher quelle est la forme de régulateur qui donne la plus faible valeur de ce radical, c'est-à-dire quelle est la forme qui permet de donner à la machine le plus petit volant, à égalité de valeur de E, de $c$, de $\lambda$ et de $\mu$.

A cet effet, je vais comparer les trois formes de régulateurs auxquels cette formule s'applique, c'est-à-dire :

1° Le régulateur de Porter (Pl. VII, *fig.* 2) ;

2° Le régulateur de Watt sans surcharge du manchon (Pl. VII, *fig.* 5) ;

3° Le régulateur du regretté Rolland, membre de l'Institut (Pl. IX, *fig.* 3). Ce régulateur avait été imaginé par Rolland pour diminuer le plus possible l'influence de l'inertie des masses du régulateur.

Je vais faire une application numérique du second radical à chacun de ces régulateurs.

1° Appliquons d'abord au régulateur de Porter ; le radical est égal à 1, si P est suffisamment petit par rapport à Q.

2° Appliquons au régulateur de Watt.

Faisons :

$$E = 0{,}05, \qquad c = 0{,}06.$$

La distance L du sommet du régulateur au milieu de la course est donnée par la formule (§ 2) :

$$L = \frac{c}{2E} = \frac{0{,}06}{2 \times 0{,}05} = 0^m{,}60.$$

Faisons :

$$a = 0^m{,}37, \qquad b = 0^m{,}58.$$

Désignons par $L_1$ et $L_2$ les valeurs extrêmes de L ; on a :

$$L_2 = 0^m,60 - 0,03 = 0^m,57$$
$$L_1 = 0^m,60 + 0,03 = 0^m,63.$$

Or, on a :

$$L_1 = 2a \cos \alpha_1$$

d'où :

$$\cos \alpha_1 = \frac{L_1}{2a} = \frac{0,63}{2 \times 0,37} = 0,85 ;$$

d'où :

$$\alpha_1 = 32°.$$

On a :

$$L_2 = 2a \cos \alpha_2,$$

d'où :

$$\cos \alpha_2 = \frac{L_2}{2a} \times \frac{0,57}{2 \times 0,37} = 0,77 ;$$

d'où :

$$\alpha_2 = 39° \frac{1}{2},$$

$$\alpha_2 - \alpha_1 = 39 \frac{1}{2} - 32 = 7° \frac{1}{2},$$

$$c' = 2\pi b \times \frac{7° \frac{1}{2}}{360} = 0^m,076.$$

Cela posé, le radical devient avec le régulateur de Watt :

$$\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}} = \sqrt{\frac{2\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{\frac{b}{a}}},$$

puisque Q est très petit par rapport à P.

Remplaçons $c$, $c'$, $b$, $a$, par leurs valeurs ; il vient :

$$\sqrt{\frac{2 \times \left(\frac{0,076}{0,060}\right)^2}{\left(\frac{0,58}{0,37}\right)}} = 1,44.$$

Ainsi avec le régulateur de Watt de notre exemple numérique, le second radical est égal à 1,44 ; en d'autres termes, le volant de la machine doit être plus fort de 44 p. 100 qu'avec le régulateur de Porter.



Cette conclusion a une importance considérable ; elle montre qu'il faut absolument abandonner le régulateur de Watt et donner la préférence à celui de Porter, comme le font aujourd'hui la plupart des constructeurs. Il faut aussi que, dans le régulateur de Porter, P soit très petit par rapport à Q ; il ne faut pas cependant exagérer dans cette voie, car alors la vitesse de rotation du régulateur deviendrait trop forte ; il en résulterait qu'en cas de rupture des bielles, les boules seraient lancées dans l'atelier avec une vitesse énorme, comme de véritables projectiles. Appliquons maintenant le deuxième radical au régulateur de Rolland (Pl. IX, *fig.* 3).

Supposons que $b = \frac{a}{2} = \frac{0,37}{2}$. Conservons toutes les autres dimensions ; on a :

$$c' = 2\pi \frac{a}{2} \times \frac{7°,5}{360} = 0,024.$$

Le deuxième radical devient :

$$\sqrt{\frac{2\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{\frac{b}{a}}} = \sqrt{\frac{2 \times \left(\frac{0,024}{0,060}\right)^2}{\frac{1}{2}}}, \text{ ou } 0,80.$$

Ainsi avec le régulateur de Rolland de notre exemple numérique, le second radical est égal à 0,80 ; en d'autres termes, le volant de la machine peut être de 20 p. 100 inférieur à celui qui est nécessaire avec le régulateur de Porter.

Le régulateur de Rolland est donc théoriquement très avantageux ; malheureusement les formules de la puissance du régulateur montrent qu'il est peu puissant ; il

faudrait des boules énormes pour lui donner la puissance voulue, surtout avec de fortes machines; c'est ce qui fait que cet appareil n'a pas été employé dans la pratique. Il était bon cependant de le mentionner ici, d'abord à cause de son intérêt historique, puis pour montrer comment ma formule permet de faire facilement la comparaison des formes diverses de régulateurs.

En faisant des études analogues pour les régulateurs de Farcot, Andrade, Proëll, etc., on montrerait qu'il est toujours plus avantageux d'obtenir la puissance du régulateur avec un manchon surchargé et de petites boules, qu'avec un manchon sans surcharge et de grosses boules; le régulateur doit alors être à grande vitesse, comme celui de Porter. Quand on le peut, il est bon de mettre les boules au croisement des bielles, comme dans le régulateur de Porter; cette disposition a l'avantage de ne faire travailler les bielles qu'à l'extension, et non à la flexion; elle diminue donc les chances de rupture des bielles, ruptures qui peuvent causer des accidents, comme je l'ai fait remarquer.

§ 21. — **Cas des régulateurs à boules, à poids et à ressorts, et du régulateur dans le volant.** — J'arrive à un cas très important: c'est celui des régulateurs à boules, à poids et à ressorts, comme le cas du régulateur représenté par la *fig.* 9 (Pl. VII).

Ce cas a une grande importance, parce que son emploi permettrait d'améliorer les conditions de régularisation des machines Corliss et des machines analogues, en constituant un progrès dans l'établissement des régulateurs de ces machines.

Je suppose d'abord que P soit très petit à côté de Q et de R (Q désignant le poids du manchon, et R la compression moyenne du ressort).

Je vais de nouveau poser les trois équations du § 18,



en les modifiant d'après les conditions du nouveau régulateur considéré.

L'équation (1) est encore:

$$x = y \times \frac{E}{38},$$

ou bien :

$$(1) \qquad y = x \times \frac{38}{E}.$$

L'équation (2) est encore :

$$(2) \qquad \frac{1}{2}\frac{Q}{g}\left(\frac{c}{x}\right)^2 = F\lambda c.$$

L'équation (3) devient :

$$(3) \qquad \mu E = \frac{F}{2(Q+R)};$$

d'où l'on tire :

$$F = 2\mu E(Q+R).$$

Substituons dans (2); il vient :

$$\frac{1}{2}\frac{Q}{g}\left(\frac{c}{x}\right)^2 = 2\lambda\mu E(Q+R)\,c,$$

ou bien :

$$\frac{Qc}{2gx^2} = 2\lambda\mu E(Q+R);$$

d'où :

$$x^2 = \frac{Qc}{4g\lambda\mu E(Q+R)};$$

ou :

$$x = \sqrt{\frac{Qc}{4g\lambda\mu E(Q+R)}}.$$

Substituons dans (1), il vient :

$$y = \frac{38}{E}\sqrt{\frac{Qc}{4g\lambda\mu E(Q+R)}},$$

$$(4) \qquad y = 6\sqrt{\frac{C}{\lambda\mu E^3}} \times \sqrt{\frac{Q}{Q+R}}.$$

Telle est la valeur $y$ de la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval dans ce cas ; elle a la même forme qu'au § 18, multipliée par la valeur $\sqrt{\frac{Q}{Q+R}} = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{R}{Q}}}$

Dans ce qui précède on suppose que le poids P des boules est très petit par rapport au poids Q du manchon. Mais il peut arriver que l'on ait recours à un régulateur à ressort dans lequel P est du même ordre de grandeur que Q, et même plus fort, Q se réduisant au poids d'une pièce légère, comme dans le régulateur de Watt.

Dans ce cas les formules (1) et (2) sont les mêmes, mais la formule (3) devient :

$$\mu E = \frac{F}{\left[2P\frac{b}{a} + Q + R\right]}.$$

Il en résulte qu'en faisant les mêmes calculs on arrive à la formule suivante :

(4 *bis*) $$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q + R}}$$

Telle est la formule de la corrélation dans le cas d'un régulateur à ressort, P n'étant pas négligeable par rapport à Q. Le frein à l'huile se calcule comme ci-dessus.

Il résulte de cette formule que $y$ est d'autant plus petit que R est plus grand par rapport à Q.

En résumé l'emploi de mon régulateur de la *fig.* 9 (Pl. VII) réaliserait donc un progrès pour la régulation des machines Corliss et analogues. Mais ce n'est pas le seul qui permette d'obtenir ce résultat. On pourrait employer des régulateurs à ressort du genre du régulateur de Tangye



et analogues, avec frein à huile. On trouvera sans doute des dispositions excellentes dans cet ordre d'idées.

Dans le cas du régulateur dans le volant du § 9, nous avons trouvé pour la puissance du régulateur la formule :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{f}{4F\left(\frac{c'}{c}\right)},$$

qui devient ici :

$$\mu E = \frac{F}{4R\left(\frac{c'}{c}\right)}.$$

En faisant les mêmes calculs, on trouve :

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{2R\left(\frac{c'}{c}\right)}};$$

Q, poids du manchon ;
P, poids des contrepoids ;
R, compression moyenne des ressorts ;
$c'$, course des contrepoids ; et $c$, course du manchon.

Il résulte de cette formule que plus R est grand par rapport à Q, plus $y$ est petit.

On voit donc quel grand avantage ont les régulateurs à ressorts ; ils permettent d'employer des volants plus petits, tout en évitant les perturbations du deuxième genre ; il y a donc un grand intérêt à les adopter dans la pratique, soit pour diminuer les volants des machines actuelles, soit pour permettre d'employer un régulateur ayant un écart de vitesse E plus faible que dans la machine Corliss actuelle. On les munirait d'un frein à huile calculé comme il est dit ci-dessus. On aurait alors une régularité de marche merveilleuse, supérieure à ce qui a été réalisé jusqu'à présent. J'insiste tout particulièrement sur ce point, qui est fondamental. Il y a lieu de remarquer que

mon régulateur de la *fig.* 9 (Pl. VII) permet précisément d'adopter une faible valeur de E, comme on l'a vu au § 7, avec des dimensions modérées; il serait bon de laisser au manchon une certaine masse, pour mieux résister au choc des organes de déclic, tout en laissant au ressort une grande puissance; on peut, par exemple, faire Q égal à R dans ce régulateur; il est préférable de réserver, pour les régulateurs à valve, les régulateurs à ressorts qui n'emploient que des boules et un manchon de masse insignifiante.

En résumé, il y a un progrès à réaliser dans la régulation des machines Corliss, en employant des régulateurs à ressort.

## IV. — Théorie des perturbations du troisième genre de la position du manchon du régulateur.

(Cette théorie, entièrement nouvelle, est exposés aux § 22 à 29 suivants. Je l'ai imaginée à la suite de mes recherches faites depuis 1888 et pour répondre à la question posée par l'Académie.)

§ 22. — **Définition des perturbations du troisième genre.** — J'appellerai perturbations du troisième genre de la position du manchon du régulateur toutes celles qui résultent des frottements du régulateur lui-même et des diverses réactions de l'organe de déclic, au moment où a lieu la rencontre de cet organe avec la touche (*fig.* 1, Pl. IX).

§ 23. — **Action des frottements du régulateur.** — On cherche à rendre aussi petits que possible les frottements du régulateur, et le meilleur moyen est de construire l'appareil avec soin, pour qu'il n'y ait pas de gauche dans les articulations et en laissant aux axes un jeu largement suffisant. Malgré tout, il reste de légers frottements. Soient $f$ un de ces frottements, et $a$ le rapport de son chemin



parcouru au chemin parcouru $c$ par le manchon du régulateur pendant sa course totale ; ce chemin parcouru par le frottement $f$ est donc égal à $a \times c$ ; le travail du frottement considéré est égal à $f \times a \times c$.

La somme du travail de tous les frottements du régulateur est égale à :

$$\Sigma f.a.c = c\Sigma f.a.$$

Je désigne $\Sigma fa$ par $F_0$ ; c'est ce que j'appellerai la somme des frottements du régulateur, évaluée au manchon.

Cela posé, supposons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse du régulateur de Watt, ou de Porter, ou de Farcot, ou encore du régulateur à points de suspension séparés.

Dans ces divers cas, nous avons trouvé dans la première partie la formule suivante :

$$\frac{dn}{n} = \frac{F_0}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)},$$

$\frac{dn}{n}$ étant la perturbation relative de vitesse due à l'effort $F_0$, évaluée au manchon du régulateur.

Pour que la perturbation due à $F_0$ n'ait pas d'influence fâcheuse sur la régularisation de la marche de la machine, il faut et il suffit que $\frac{dn}{n}$ soit sensiblement plus petit que l'écart relatif de vitesse E du régulateur; il faut donc que :

$$\frac{dn}{n} = \frac{F_0}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)} = \delta E,$$

$\delta$ désignant une fraction de l'unité qu'il convient de choisir assez faible ; on prendra par exemple, dans la pratique,

$\delta = \frac{1}{10}$. En appliquant cette formule dans la pratique, on verra qu'elle est toujours aisément remplie, si le régulateur est bien construit, c'est-à-dire si les pièces se meuvent aisément. Il est donc à peine nécessaire de faire le calcul de cette formule dans la pratique courante. Cependant, il est bon de le faire pour certains régulateurs, comme celui d'Andrade, ou de Tangye, qui donnent lieu à quelques glissements de pièces entre elles.

§ 24. — **Réaction de l'organe du déclic sur le manchon du régulateur.** — Nous arrivons à l'action perturbatrice, plus grave, de l'organe du déclic sur le manchon du régulateur, au moment de la rencontre de cet organe avec la touche.

Si nous nous reportons à la *fig.* 1 (Pl. IX), on voit que ces réactions sont de deux espèces, que nous allons étudier séparément.

Je désigne par $e$ le chemin très court parcouru par le point Q pendant que la touche agit sur la partie EG de l'organe de déclic, depuis le commencement de la rencontre jusqu'au moment précis où a lieu la rupture entre B et D. Cela posé, je désigne par $f$ l'effort qu'il faudrait exercer au point Q perpendiculairement à la surface EG pour produire à la main la séparation des pièces B et D; la valeur de $f$ peut se calculer aisément; en effet, désignons par $t$ l'effort de compression subie par la tige AB à cet instant, effort facile à évaluer d'après la forme des distributeurs d'admission de vapeur; la valeur de $f$ est égale à $t \times \frac{1}{20}$, $\frac{1}{20}$ étant le coefficient de frottement des deux pièces B et D graissées.

On peut encore mesurer $f$ sur une machine Corliss existante, au moyen d'un petit dynamomètre, ce qui dispense de se rendre compte de la valeur de $t$.



On voit, en passant, que le travail absorbé par le déclic est bien faible, puisque $f$ est faible et que le chemin parcouru $e$ est très petit; on le rend aussi petit que possible en disposant les pièces B et D en conséquence.

Cela posé, on voit que la touche Q devra d'abord subir un effort égal à $f$ et normal à la surface EG, pour que le déclic se produise.

En outre, la touche subira un autre effort tangent à la surface et dû au frottement de l'effort $f$, soit environ $\frac{f}{20}$; si la surface est bien graissée, nous négligerons cet effort; jusqu'à présent, nous négligeons l'inertie de l'organe de déclic; nous en reparlerons plus loin.

En résumé, nous avons donc à tenir compte d'un effort connu $f$, perpendiculaire à la surface EG et s'exerçant sur une longueur du chemin parcouru $e$.

Il en résulte un premier travail $f \times e$ qui tend à déplacer le manchon du régulateur.

Mais ce n'est pas tout : en effet, nous avons négligé l'inertie de l'organe de déclic en le supposant infiniment léger. Ce n'est pas le cas de la pratique. Sans doute, on peut rendre cet organe bien léger, mais son poids n'est pas négligeable; cela dépend du type de machine adopté; mais, quoi qu'il en soit, je le répète, il faut évaluer par le calcul l'influence de cette réaction de l'organe de déclic.

Je désigne par $\omega'$ la vitesse angulaire que l'organe de déclic a prise autour de son axe E au moment de la rupture du déclic; cette vitesse ne doit pas être confondue avec la vitesse de translation de l'ensemble du système mobile; c'est la vitesse relative due à la rotation de l'organe de déclic autour de l'axe E.

Cette vitesse angulaire est facile à calculer en faisant l'étude cinématique de l'organe de déclic, pendant la rupture. Désignons par $i$ le moment d'inertie de l'organe de

déclic ; il est clair que la $\frac{1}{2}$ force vive que l'organe de déclic aura prise sous l'action du choc est égale à $\frac{i}{2}\omega'^2$ ; pour simplifier les calculs à effectuer, je désignerai par $f''$ la force qu'il faudrait appliquer en Q à l'organe de déclic avec le chemin parcouru $e$, pour produire la $\frac{1}{2}$ force vive $\frac{i}{2}\omega'^2$, la relation étant naturellement :

$$\frac{i}{2}\omega'^2 = f'' \times e, \qquad \text{ou :} \qquad f'' = \frac{i}{2e}\omega'^2.$$

Donc on peut dire qu'il se produit un deuxième travail $f'' \times e$ qui tend à déplacer le manchon, de sorte qu'au total les réactions de l'organe de déclic sur le manchon sont représentées par le travail $(f' + f'') \times e$, expression dans laquelle $f'$, $f''$ sont connues.

§ 25. — **Cas du régulateur de Porter et analogues.** — Il faut maintenant trouver la puissance qu'il faut donner au frein à huile et au régulateur pour qu'ils ne soient pas troublés par l'influence de $(f' + f'')\, e$, dont il vient d'être question. Le raisonnement va être absolument analogue à celui qui nous a guidé dans l'étude des perturbations du deuxième genre. Je suppose qu'il s'agisse, non d'un frein à huile, mais d'un frein F à action constante, comme celui que donnerait un frottement.

Les réactions de l'organe de déclic représentées par le travail $(f' + f'')\, e$ produisent un déplacement des boules du régulateur, d'où une force vive axiale de cet organe ; cette force vive est ensuite absorbée par le frein ; si nous négligeons la force vive perdue dans le choc, hypothèse défavorable, il faut que le travail absorbé par le frein soit égal à $(f' + f'')\, e$ ; soient F sa puissance, et $\lambda c$ son chemin parcouru, en fonction de la course du manchon ; comme dans l'étude des perturbations du deuxième genre, on a :



$$F \times \lambda c = (f' + f'')\, e, \qquad \text{d'où :} \quad (1) \quad F = \frac{(f' + f'')\, e}{\lambda c}.$$

D'autre part, il faut que la perturbation relative de vitesse due à la présence du frein constant F soit sensiblement inférieure à E, ou égale à $E \times \mu$, en conservant toujours les mêmes notations ; on a donc :

(formule 5 du § 18) $$\mu E = \frac{F}{2Q} ;$$

on tire de cette formule, en remplaçant F par sa valeur :

(2) $$Q = \frac{F}{2\mu E} = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu E c}.$$

Telles sont les formules qui donnent les valeurs de F et de Q qu'on se proposait de trouver.

Si le frein, au lieu d'être un frein constant, est un frein à huile, le frein à huile devra avoir comme ci-dessus une puissance telle que son travail absorbé soit égal à $F \times \lambda c$ avec le même chemin parcouru $\lambda c$ ; c'est très facile à obtenir en le réglant par tâtonnements.

§ 26. — **Cas du régulateur de Watt et de Farcot.** — On a encore dans le cas du régulateur de Watt et de Farcot :

(1) $$F = \frac{(f' + f'')e}{\lambda e} ;$$

d'autre part, on a, en appliquant la formule de la puissance du régulateur :

(2) $$\mu E = \frac{F}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)}.$$

Examinons maintenant deux cas pour la formule (2).

1° $Q = 0$. — Dans ce cas, la formule (2) devient :

$$\mu E = \frac{F}{2P\frac{b}{a}}, \qquad \text{d'où :} \qquad P = \frac{F}{2\mu E\left(\frac{b}{a}\right)},$$

ou bien :

$$P = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu Ec\left(\frac{b}{a}\right)};$$

2° Q *n'est pas nul.* — Dans ce cas, posons $\frac{P}{Q} = A$; il vient :

$$\mu E = \frac{F}{2Q\left(A\frac{b}{a} + 1\right)},$$

d'où l'on tire :

$$Q = \frac{F}{2E\mu\left(A\frac{b}{a} + 1\right)},$$

$$Q = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu Ec\left(A\frac{b}{a} + 1\right)}$$

(A est un rapport qu'on se fixe arbitrairement, comme on le sait). Tout est donc connu.

§ 27. — **Cas des régulateurs quelconques à boules et à poids.**— Il est facile d'appliquer la même méthode à tous les régulateurs quelconques à boules et à poids.

On arriverait à une formule analogue, comme on le verra dans la septième partie.

§ 28. — **Cas des régulateurs à boules, à poids et à ressorts, et des régulateurs dans le volant.** — Pour les régulateurs à boules et à ressorts, à axe vertical, les formules deviendraient :

$$F = \frac{(f' + f'')e}{\lambda c}, \qquad Q = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu Ec\left(A\frac{b}{a} + B + 1\right)},$$



Dans cette formule $A = \frac{P}{Q}$ et $B = \frac{R}{Q}$ (R, tension du ressort).

Ces deux valeurs A et B se fixent arbitrairement. Pour les régulateurs à ressorts dans le volant, on a :

$$F = \frac{(f' + f'')e}{\lambda c}, \qquad \mu E = \frac{F}{4R\left(\frac{c'}{c}\right)}$$

(cette formule est extraite du § 9 ; R est la puissance du ressort). On tire de la deuxième formule :

$$R = \frac{F}{4\mu E\left(\frac{c'}{c}\right)} = \frac{(f' + f'')e}{4\lambda\mu Ec\left(\frac{c'}{c}\right)} = \frac{(f' + f'')e}{4\lambda\mu Ec'}.$$

Cette formule donne la puissance du régulateur.

Ces formules de la puissance du régulateur diffèrent en apparence de celles qui j'ai données dans mon mémoire de mai 1895 à l'Académie ; mais, en réalité, au fond, il est facile de voir que ce sont les mêmes sous une nouvelle forme *plus simple*.

## V. — Théorie des perturbations du quatrième genre de la position du manchon du régulateur.

§ 29. — **Définition des perturbations du quatrième genre.** Dans la pratique la quatrième hypothèse de ma théorie des régulateurs à maximum et minimum n'est pas réalisée ; en d'autres termes, quand il se produit une variation du travail résistant pendant la détente, la vitesse change, et ce n'est qu'à la fin de l'admission suivante que le régulateur peut agir pour faire varier le travail moteur.

Cette perturbation dans le jeu du régulateur a été étudiée par M. Hirsch, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, dans son *Cours autographié de machines à*

*vapeur* (1877-1878). Mais je vais étudier la question autrement, pour rester toujours dans la théorie du régulateur à maximum et minimum qui m'a servi de point de départ et qui me servira jusqu'à la fin de ce mémoire.

§ 30. — **Cas d'une machine à cylindre unique.** — Je désigne par T le travail moteur par demi-tour de volant, en supposant que l'admission atteigne son maximum, et je suppose que ce maximum corresponde à la position inférieure du manchon du régulateur ; la machine peut donc fournir un travail maximum égal à 2T par révolution du volant ; soit Φ la force en chevaux de la machine correspondant à ce travail maximum ; soit N le nombre de révolutions du volant par minute à la vitesse du régime ; on a :

$$T = \frac{60 \times 75}{2N} \times \Phi.$$

Quant au travail résistant, je le suppose tel que son moment ne dépasse jamais le moment moyen de l'effort moteur, par rapport à l'axe du volant, en supposant que la machine donne son maximum de puissance. C'est ce qui se passe dans la pratique, en mettant de côté le cas exceptionnel où l'on demande au volant un effort considérable et momentané, comme dans le cas d'un gros laminoir.

Plaçons-nous maintenant dans le cas le plus défavorable ; je suppose que, pendant la détente, la vitesse de la machine se soit accélérée et que le manchon soit arrivé au haut de sa course par suite d'une diminution subite du travail résistant ; alors le régulateur ne permettra aucune admission de vapeur ; puis, je suppose qu'aussitôt après le moment du travail résistant prenne une valeur constante et telle que le travail résistant soit égal au maximum du travail moteur par révolution du volant. Alors, pendant la



demi-révolution que le volant va accomplir, le volant n'aura plus aucune force pour l'entraîner, et il devra emprunter à sa $\frac{1}{2}$ force vive seule le travail à accomplir, travail égal à T, d'après l'hypothèse dans laquelle nous nous plaçons.

Soient $V_2$ la vitesse de la jante du volant à l'origine de la demi-révolution considérée, et $V_1$ sa vitesse à la fin de cette demi-révolution ; il est certain que la demi-force vive perdue par le volant pendant cette demi-révolution est égale à T, valeur du travail résistant, puisque le travail moteur est nul ; on a donc :

$$\frac{1}{2} M V^2_2 - \frac{1}{2} M V^2_1 = T = \frac{60 \times 75}{2N} \times \Phi.$$

Ici, comme ci-dessus, M désigne la masse de la jante du volant, sans tenir compte des bras, pour les motifs expliqués au § 13.

Cette équation peut s'écrire :

$$\frac{1}{2} M (V^2_2 - V^2_1) = \frac{1}{2} M (V_2 - V_1)(V_2 + V_1) = \frac{60 \times 75}{2N} \times \Phi.$$

Divisons et multiplions par $\frac{V_2 + V_1}{2}$ ; il vient :

$$\frac{1}{2} M \frac{V_2 - V_1}{\left(\frac{V_2 + V_1}{2}\right)} (V_2 + V_1) \frac{V_2 + V_1}{2} = \frac{60 \times 75}{2N} \times \Phi.$$

Soit W la vitesse de régime de la jante du volant ; on a sensiblement $V_2 + V_1 = 2W$ ; substituons ; il vient :

$$\frac{1}{2} M \frac{V_2 - V_1}{\left(\frac{V_2 + V_1}{2}\right)} \times 2W \times W = \frac{1}{2} M \frac{V_2 - V_1}{\frac{V_2 + V_1}{2}} \times 2W^2 = \frac{60 \times 75}{2N} \times \Phi.$$

D'où :

$$\frac{1}{2} M \frac{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}{2} \times W_2 = \frac{60 \times 75}{4N} \times \Phi = \frac{75}{4} \times \frac{60}{N} \times \Phi = \frac{75}{4} \times \frac{60}{N} \times \Phi.$$

Cela posé, $V_2$ est égal à la vitesse qui correspond à la position supérieure du manchon du régulateur, d'après nos hypothèses ; je vais alors déterminer le volant d'après la condition que la vitesse de la jante $V_1$, après la $\frac{1}{2}$ révolution considérée, soit celle qui correspond à la position inférieure de notre régulateur; en d'autres termes, on aura :

$$\frac{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}{2} = E,$$

E étant l'écart relatif de vitesse du régulateur.

De cette façon, même en nous plaçant dans l'hypothèse la plus défavorable, la vitesse ne sera pas sortie des limites correspondant au régulateur à maximum et minimum.

Il serait très exagéré de poser cette condition que le manchon du régulateur ne devrait parcourir qu'une partie de sa course dans le cas considéré, au lieu de parcourir sa course entière, et cela pour les deux motifs suivants :

1° Le cas considéré est un cas exceptionnel, qui ne se représentera pour ainsi dire jamais, de sorte qu'il serait exagéré de calculer le volant, pour éviter un mouvement un peu rapide du manchon dans ce cas;

2° Le cas considéré correspond justement à la même vitesse de manchon que dans l'étude ci-dessus des perturbations du deuxième genre; or, nous avons vu que le mouvement du manchon était arrêté avec cette vitesse par le frein à huile, dans de très bonnes conditions; donc il n'y a rien à craindre.



On aura donc en substituant :

$$\frac{1}{2} M \times E \times W^2 = \frac{75}{4} \times \frac{60}{N} \times \Phi.$$

Cette équation peut s'écrire :

$$\frac{\frac{1}{2} MW^2}{\Phi} = \frac{75}{4} \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E} = 19 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}.$$

(Nous prenons 19 au lieu de 18,75, en arrondissant: ces sortes de calculs ne comportent pas une précision absolue.)

Cette formule permet de calculer aisément la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval de la force motrice maxima de la machine pour que, dans le cas le plus défavorable, la vitesse ne sorte jamais des limites qu'on s'est données et qui correspondent à l'écart relatif E du régulateur.

Cette formule donne un minimum pour le volant ; en donnant au volant un poids plus fort que celui qui résulte de ce volant, la vitesse $V_1$ n'arriverait même pas à la limite correspondant à la partie inférieure du manchon du régulateur; seulement alors le manchon ne trouverait pas du premier coup sa position d'équilibre; il la retrouverait en quelques petits sauts allant en décroissant successivement.

Continuons et voyons ce qui va se passer après la $\frac{1}{2}$ révolution considérée; le manchon étant en bas de sa course, le travail moteur reprend son maximum; donc, tant que le travail résistant sera égal à son maximum, qui est égal, avons-nous dit, au maximum du travail moteur, tout restera dans le *statu quo*.

En d'autres termes, le manchon conserve, comme position d'équilibre, sa position inférieure, à laquelle il est arrivé du premier coup.

Dans la pratique, le soubresaut du manchon sera naturellement beaucoup moindre que dans l'hypothèse la plus défavorable, que je viens d'examiner.

Par exemple, au lieu de nous placer dans l'hypothèse la plus défavorable précédente, on peut supposer que le travail moteur soit égal à la moitié de son maximum, et que le travail résistant devienne subitement égal à son maximum, le manchon partant du milieu de sa course; alors, en reprenant les mêmes calculs, on verrait que le manchon ferait un soubresaut de la moitié de sa course; il arriverait du premier coup, comme dans le cas précédent, à sa nouvelle position d'équilibre, c'est-à-dire en bas de sa course.

De même, si le travail résistant variait de $\frac{1}{n}$ de son maximum, les mêmes formules montreraient que le manchon sauterait de $\frac{1}{n}$ de la course totale, et la variation correspondante du travail moteur resterait toujours appropriée aux besoins.

Il y a une autre hypothèse défavorable à examiner, c'est la suivante : Je suppose que le manchon soit tombé en bas de sa course au commencement de la demi-révolution considérée ; je suppose, en outre, que le travail résistant tombe brusquement à zéro aussitôt après ; mais alors le manchon s'élèvera et ne permettra pas à l'admission d'atteindre son maximum; on aura donc pendant la $\frac{1}{2}$ révolution un travail résistant nul et un travail moteur inférieur à son maximum; cette hypothèse conduirait au même calcul que l'hypothèse précédente, avec une légère différence cependant ; en effet, dans ce dernier cas, le régulateur aura toujours le temps de monter un peu et de limiter le travail moteur à une valeur un peu inférieure à T; l'hypothèse est donc moins défavorable que la première, de sorte qu'il est inutile d'en tenir compte.



M. Hirsch, dans son cours ci-dessus indiqué, a fait une théorie serrant de plus près l'étude de ces perturbations du quatrième genre : il a donné pour le calcul du volant une formule d'où il résulte une valeur plus faible pour l'extrême limite de petitesse du volant. Mais les perturbations du quatrième genre ne sont pas les seules ; elles existent en même temps que celles du premier et du deuxième genres, de sorte que je préfère ne pas atteindre l'extrême limite. Je m'en tiendrai donc aux formules prudentes ci-dessus pour les perturbations du quatrième genre.

Nous savons donc comment on doit calculer le volant, en fonction du régulateur, pour tenir compte de la quatrième cause d'oscillations dans la machine à cylindre unique.

§ 31. — **Cas d'une machine à deux cylindres ordinaires.** — Examinons le cas d'une machine à deux cylindres non compound, calés à 90°. Le plus souvent l'admission ne dépasse pas 50 p. 100 dans chacun des cylindres; il y aura donc quatre admissions successives et jamais en même temps, dans chaque révolution du volant. Ce cas se déduit donc du précédent, avec cette différence que ce n'est plus pendant $\frac{1}{2}$ révolution, mais pendant $\frac{1}{4}$ de révolution seulement au plus que l'action du régulateur est nulle sur l'organe d'admission; la formule devient donc :

$$\frac{\frac{1}{2}MW^2}{\Phi} = \frac{19}{2} \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E} = 9{,}5 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}.$$

§ 32. — **Cas d'une machine compound.** — Examinons, enfin, le cas des machines compound, le cylindre d'admission et celui de détente étant calés à 90°.

Dans cette machine nous considérons d'abord la portion de la vapeur admise au commencement de la période de

temps considérée; cette vapeur, une fois l'admission fermée, continue à se détendre dans le premier et le deuxième cylindres sans que le régulateur ait aucun moyen de modifier son travail moteur; elle se trouve donc dans le cas du cylindre unique; mais il faut observer que cette détente ne se fera qu'en partie pendant la première $\frac{1}{2}$ révolution du volant; le reste de la détente se fera dans l'autre cylindre, à un moment où le régulateur pourra agir sur l'admission suivante. Le cas se rapprochera alors du cas des deux cylindres à pleine admission calés à 90° sans être cependant aussi avantageux, car le régulateur, même en fermant complètement l'admission, ne pourra pas empêcher l'achèvement de la détente de la vapeur se trouvant déjà dans le deuxième cylindre. La formule tout à fait exacte dépendrait des conditions de marche de la machine compound; mais, en nous plaçant dans un cas moyen, il convient d'adopter la même formule avec le coefficient numérique $\frac{19 + 9{,}5}{2} = 14{,}2$.

On a donc :

$$\frac{\frac{1}{2} M W^2}{\Phi} = 14 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E},$$

pour la machine compound.

## VI. — Résistance a la rupture du volant.

§ 33. — **Calcul de la jante au point de vue de la résistance.** — Nous rappellerons ici quelle est la vitesse maxima W que doit avoir la jante du volant pour ne pas être exposée à la rupture; un calcul bien simple, enseigné dans tous les cours de machines à vapeur, montre que, pour la vitesse de 15 mètres par seconde, le métal de la jante travaille à l'extension à raison de $0^{kg},18$ par millimètre carré; c'est un chiffre admis comme raisonnable pour les volants de fonte avec assemblages.



Si la vitesse W était différente de 15 mètres, le travail par millimètre carré serait de :

$$0^{kg},18 \times \frac{V^2}{(15)^2}.$$

Il s'agit du travail par millimètre carré de la jante à pleine section. Naturellement, dans les assemblages, le travail est augmenté en proportion de la diminution de section.

En employant des volants construits autrement qu'en fonte, on pourrait aborder sans danger des vitesses bien supérieures, avec des frettes en acier autour de la jante par exemple. Le calcul classique dont il vient d'être question suppose que la jante offre seule une résistance pour faire équilibre à la force centrifuge. En réalité, les bras viennent aider à la solidité de la jante; on peut se demander de combien cela diminue le travail par millimètre carré de la jante. Le problème posé de cette façon serait très difficile; on pourrait le simplifier beaucoup avec des calculs approchés, mais cela m'entraînerait en dehors de la question. Au point de vue des applications, la formule précédente est suffisante, puisqu'elle est un peu plus prudente que la formule rigoureuse (*).

§ 34. — **Calculs des rayons au point de vue de la résistance.** — Les rayons sont toujours assez résistants pour porter le poids de la jante du volant ; mais leur principal rôle consiste à transmettre à la jante le moment du travail moteur, si la courroie de transmission est placée sur le volant.

Ce moment se calcule aisément d'après la courbe de la

(*) M. Résal, membre de l'Institut, a donné des formules importantes à ce sujet dans son *Traité de Mécanique générale*.

Pl. VIII. Ce calcul doit être fait en y introduisant un coefficient de sécurité suffisant, car il ne tient pas compte de l'inertie des bielles et pistons.

On pourrait à la rigueur en tenir compte.

## VII. — Résumé des calculs et applications pratiques

(D'après les théories nouvelles exposées ci-dessus.)

§ 36. — **Choix de l'écart relatif de vitesse du régulateur suivant la nature de l'atelier.** — L'écart relatif de vitesse du régulateur E doit être choisi suivant que l'atelier à conduire est plus ou moins difficile au point de vue de la régularité. Voici les chiffres que j'ai adoptés dans mon étude de 1887, à la suite de nombreuses observations, chiffres que je conserve ici à peu de chose près :

| NATURE DE L'ATELIER | ÉCART RELATIF DE VITESSE DU RÉGULATEUR |
|---|---|
| Ateliers ne demandant que peu de régularité. | Entre 0,20 et 0,10 |
| Ateliers demandant une assez grande régularité, comme les ateliers de construction, les usines diverses et l'éclairage électrique à arc. | Entre 0,10 et 0,06 |
| Ateliers demandant une très grande régularité, comme les filatures et l'éclairage électrique à incandescence. | Entre 0,06 et 0,04 |
| Ateliers demandant une précision extraordinaire. | Entre 0,04 et 0,02 |



Ces chiffres supposent qu'on veut avoir des résultats excellents, bien supérieurs à ceux dont on se contente le plus souvent.

J'appelle ateliers demandant une précision extraordinaire des ateliers plus difficiles encore que tous ceux qui existent dans l'industrie. Je n'en connais pas qui exigent une précision de régularisation pareille, mais le cas pourra se présenter un jour, et c'est pourquoi j'ai cru préférable de le prévoir dans mon tableau.

Il est essentiel d'observer que les écarts pratiques de la vitesse seront le plus souvent bien inférieurs à la valeur de E, puisque la théorie suppose le cas exceptionnel du travail résistant variant constamment entre son maximum et zéro; c'est pourquoi, avec une valeur de $E = 0{,}10$ par exemple, on a déjà une régularisation très passable, et avec $E = 0{,}05$ on en a une exceptionnellement bonne; il ne faut donc pas adopter inutilement une valeur de E trop petite. Les machines du genre Corliss de l'industrie ont souvent une valeur de E de 0,10 et même davantage.

Cela posé, nous allons voir comment il faut conduire les calculs du volant et du régulateur, en appliquant les formules que j'ai données jusqu'ici dans ce mémoire.

§ 36. — **Marche des calculs et applications pratiques avec régulateur à boules, avec ou sans surcharge du manchon.** — Je commencerai par choisir E, ou écart relatif de vitesse du régulateur, suivant le tableau précédent, puis je choisirai le système du régulateur. Tous sont bons; un des plus avantageux et des plus élégants est le régulateur de Porter, mais on peut en employer un autre. Nous avons donné dans la première partie les formules qui permettent de calculer les dimensions du régulateur pour qu'il donne un écart relatif de vitesse E.

S'il s'agit par exemple du régulateur de Porter, on a

trouvé la formule :

$$(1) \qquad L = \frac{c}{2E} \qquad (V.\ \S\ 2);$$

L, distance moyenne du manchon au sommet du régulateur ;

$c$, course du manchon qu'on se donne, par exemple $= 0^m,06$ ;

E, écart relatif de vitesse donné du régulateur.

L étant connu, la longueur des bielles peut se fixer arbitrairement ; on peut la prendre égale à 0,65L pour avoir un régulateur élégant.

Le nombre de tours du régulateur par minute, à la vitesse de régime, est donné par la formule :

$$(2) \qquad n^2 = \frac{1.790}{L}\left(1 + \frac{Q}{P}\right).$$

Si l'on se donne arbitrairement $\frac{Q}{P}$, $n$ est connu.

Nous connaissons les dimensions du régulateur, sauf la valeur absolue de P et de Q, que nous déterminerons plus loin en calculant la puissance du régulateur.

Cela posé, calculons le volant en fonction de E ; ce volant doit être assez grand pour éviter les perturbations du premier genre, du deuxième genre et du quatrième genre ; nous allons le calculer successivement pour qu'il remplisse ces trois conditions, et nous prendrons naturellement la plus forte des valeurs ainsi obtenues. Pour éviter les perturbations du premier genre, nous avons expliqué comment le volant se calcule d'après la théorie classique (§ 12 et 13).

Nous sommes arrivés à la formule :

$$(3) \qquad \frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 37{,}5 \times 0 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{\varepsilon}.$$



Dans cette formule, on se rappelle : que la demi-force vive du volant se compte en tenant compte seulement de la jante du volant ; que le nombre de chevaux de la machine représente la puissance maxima disponible avec la disposition de la machine ; que 0 est une fraction dépendant du degré de détente, du nombre de cylindres, etc..., fraction que nous avons déterminée en traçant une courbe ; que $\varepsilon$ est l'écart relatif de vitesse dû au volant qu'on choisit égal à une fraction de E, par exemple $\frac{1}{3}$ de E pour tenir compte des observations du § 12, qui montrent que ces oscillations sont peu à craindre ; on se rappelle aussi que N est le nombre de tours par minute de la machine.

Pour éviter les perturbations du deuxième genre, nous sommes arrivés à la formule suivante :

$$(4) \qquad \frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}} = y$$

(la $\frac{1}{2}$ force vive du volant et le nombre de chevaux, comme ci-dessus).

$c$ est la course totale du manchon du régulateur ;

E, l'écart relatif de vitesse du régulateur ;

$\lambda$ et $\mu$ des fractions dont le sens a été défini au § 18, et qu'on prend, par exemple, égales à 0,25 et 0,33.

On a trouvé, § 19, une formule analogue, à peine plus compliquée pour le cas du régulateur de Watt et de Farcot.

Pour éviter les perturbations du quatrième genre, nous sommes arrivés à la formule suivante :

(5)
1° Cas d'une machine à cylindre unique :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 19 \times \frac{60}{N} \times \frac{E}{1}.$$

2° Cas d'une machine à deux cylindres à 90° :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 9{,}5 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}.$$

3° Cas d'une machine compound :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 14 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}.$$

En résumé, le volant se calcule successivement par la formule (3), par la formule (4) et par l'une des formules (5) ; je prendrai la plus forte de ces trois valeurs naturellement.

Enfin, il me reste à calculer la puissance du régulateur, c'est-à-dire à déterminer les poids P et Q.

Nous avons dit que leur rapport $\frac{P}{Q} = A$ pouvait se choisir arbitrairement ; il reste alors à déterminer Q, et nous le ferons de manière à éviter les perturbations du troisième genre (§ 25); on a :

$$(6) \qquad Q = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu E c}$$

pour le régulateur de Porter.

Nous avons trouvé une formule analogue (§ 26 et 28) pour les autres régulateurs; dans cette formule :

$c$ est la course totale du manchon du régulateur;

$f'$ et $f''$, les réactions du déclic définies au § 25 ;

$e$, le chemin parcouru par ces réactions.

Enfin, la puissance moyenne du frein à huile supposée constante, et telle qu'elle a été définie et calculée au § 18, est égale à :

$$F = 2Q\mu E = \frac{(f' + f'')e}{\lambda c}.$$

Nous avons terminé le résumé de toutes les formules



à appliquer ; elles ne sont pas trop compliquées, étant donnée l'extrême complexité de la corrélation entre le volant et le régulateur.

Comme on le voit, toutes les formules sont basées sur la théorie pure.

On pourrait craindre que, en me plaçant le plus souvent dans l'hypothèse la plus défavorable, je ne donne des valeurs trop élevées et trop prudentes pour la puissance du volant et celle du régulateur ; or, j'ai déjà dit ci-dessus qu'il n'en était rien pour le volant, en faisant une application numérique (§ 18) ; je vais à présent y revenir et compléter cette application numérique.

Je suppose qu'il s'agisse de régler une machine Corliss à un seul cylindre, marchant à soixante-dix tours à la minute, destinée à conduire une filature ou un éclairage électrique par incandescence, c'est-à-dire un des cas les plus difficiles de la pratique.

Je choisis $E = 0{,}05$, *en rappelant que les variations pratiques de la vitesse seront bien inférieures à* E *le plus souvent;* la vitesse ne subira guère que des variations de 2 à 3 0/0 et, le plus souvent, moins encore ; je choisis $c = 0^m{,}06$. La formule (1) ci-dessus donne :

$$L = \frac{c}{2E} = \frac{0{,}06}{0{,}1} = 0^m{,}60.$$

Je prends $A = \frac{Q}{P} = \frac{1}{10}$ par exemple, ou $\frac{Q}{P} = 10$. La formule (2) donne :

$$n = \sqrt{\frac{1.790}{L}\left(1 + \frac{Q}{P}\right)} = \sqrt{\frac{1.790}{0{,}60}(1 + 10)}.$$

$n = 181$ tours par minute.

La formule (3) donne pour la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par

cheval :

$$37{,}5 \times 0 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{\varepsilon};$$

or, $0 = 0{,}15$ dans le cas actuel, qui est celui du § 13.

$$N = 70 \text{ et } \varepsilon = \frac{E}{3} = 0{,}017,$$

$$37{,}5 \times 0{,}15 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{0{,}017} = 282 \text{ kilogrammètres par cheval.}$$

Ce chiffre est à augmenter de $\frac{1}{5}$ environ pour tenir compte de l'obliquité des bielles, comme on l'a vu § 14 ; il devient donc $282 \times \frac{6}{5} = 338$ kilogrammètres par cheval.

La formule (4) donne pour la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval :

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda \mu E^3}},$$

dans laquelle nous ferons :

$$\lambda = 0{,}5, \qquad \mu = 0{,}33, \qquad \text{et :} \quad E = 0{,}05,$$

ou :

$$y = 6\sqrt{\frac{0{,}06}{0{,}25 \times 0{,}33 \times (0{,}05)^3}} = 458 \text{ kilogrammètres par cheval.}$$

La formule (5) donne pour la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval :

$$19 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E} = 19 \times \frac{60}{70} \times \frac{1}{0{,}05} = 326 \text{ kilogrammètres par cheval.}$$

Le plus fort des trois chiffres est celui de 458 kilogrammètres par cheval ; cela n'est pas étonnant, car les perturbations du deuxième genre sont le plus souvent, en pratique, les plus nuisibles. On peut s'en assurer théoriquement, en faisant d'autres exemples numériques comme le précédent ; la pratique, du reste, montre aussi que les perturbations du deuxième genre sont bien plus à redouter que celles du premier et du quatrième genres ; il est bien évident, en effet, que les oscillations du manchon dues aux perturbations du deuxième genre ne sont pas synchroniques avec les révolutions du volant ; il est donc facile de les distinguer des oscillations dues aux perturbations du premier et du quatrième genre, qui le sont. Or, en pratique, quand un régulateur est instable, ce sont, le plus souvent, de grandes oscillations non synchroniques avec les révolutions du volant qui se produisent ; cela confirme ce qui est dit ci-dessus, c'est que les perturbations les plus nuisibles sont bien celles du deuxième genre, dues à la force vive axiale du manchon et dont j'ai donné ci-dessus la théorie nouvelle et complète. Il n'y a que dans le cas où l'on emploie les régulateurs à ressorts que les perturbations du deuxième genre s'effacent parfois à côté des autres, comme on le verra ci-après.



Revenons maintenant à notre application numérique.

Voyons quel poids il en résulte pour le volant, avec la vitesse modérée de 15 mètres à la jante.

Cela donne, en appelant $x$ le poids de la jante du volant :

$$\frac{1}{2}\frac{x}{g}(15)^2 = 458;$$

d'où :

$$x = 2g \times \frac{458}{(15)^2} = 20 \times \frac{458}{225} = 40 \text{ kilogrammètres par cheval.}$$

Cela fait 4.000 kilogrammes par 100 chevaux ; cela ferait environ 5.500 kilogrammes pour le poids total du volant.

Cela constitue un volant à peine égal à ceux qu'on

emploie habituellement pour les machines réellement bien réglées ; on voit donc, je le répète, que mes formules ne conduisent pas à des dimensions exagérées du volant. Je rappelle que, si les transmissions et leurs poulies ont une force vive notable, le volant peut être diminué d'autant. Cette remarque a une importance capitale. Je fais remarquer, en outre, que nous avons choisi E égal à 0,05, chiffre très faible, assurant une régularité bien plus grande que celle qu'on trouve le plus souvent dans l'industrie. Comme je l'ai fait observer, en effet, avec E = 0,05, les variations pratiques de la vitesse seront très sensiblement inférieures à 5 p. 100, car le travail résistant ne varie presque jamais entre son maximum et zéro, hypothèse qui a servi de base à ma théorie.

Si on faisait E = 0,08 par exemple, comme on le fait généralement dans les machines bien réglées, la $\frac{1}{2}$ force vive par cheval du volant serait :

$$y = 6\sqrt{\frac{0{,}06}{0{,}25 \times 0{,}33 \times (0{,}08)^3}} = 226 \text{ kilogrammètres,}$$

au lieu de 458, que nous avons trouvé ci-dessus ; cela ferait un volant moitié moindre, environ de 2.750 kilogrammes par 100 chevaux.

Dans ces conditions, la régularité serait encore aussi grande que celle de la plupart des machines de l'industrie, avec un volant très modéré. Si l'on voulait une régularité absolument remarquable, on prendrait E = 0,04, et l'on aurait :

$$y = 6\sqrt{\frac{0{,}06}{0{,}25 \times 0{,}33 \times (0{,}04)^3}} = 641 \text{ kilogrammètres par cheval ;}$$

cela ferait un poids total de 8.000 kilogrammes environ de volant pour 100 chevaux.



Comme ci-dessus, ce chiffre serait réduit si les transmissions avaient une $\frac{1}{2}$ force vive notable.

Donc mes formules donnent pour un volant un poids très modéré, absolument conforme à ceux qu'on observe dans les machines bien réglées ; le volant ne devient très fort que quand on veut avoir une régularité exceptionnelle.

On verra plus loin que, quand on veut employer un volant très faible et qu'on tient à avoir une régularité très grande *moyenne* par minute, sans se préoccuper de la régularité absolue, c'est le régulateur Denis qu'il faut choisir (V. § 57).

Le volant calculé, cherchons quelle doit être la puissance du régulateur en appliquant la formule (9) :

$$Q = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu E c}.$$

On a vu que $\lambda = 0{,}25$ et $\mu = 0{,}33$, E = 0,05 et $c = 0{,}06$. Je suppose $f' = 4$ kilogrammes, $f'' = 2$ kilogrammes et $e = 0{,}005$, pour une machine Corliss de 100 chevaux, chiffres très larges ; il vient :

$$Q = \frac{(4 + 2) \times 0{,}005}{2 \times 0{,}25 \times 0{,}33 \times 0{,}05 \times 0{,}06} = 61 \text{ kilogrammes.}$$

Enfin, la puissance du frein à huile est donnée par la formule (9) ci-dessus, ou :

$$F = 2Q\mu E = 2 \times 61 \times 0{,}33 \times 0{,}05 = 2^{kg}, 010,$$

évalué au manchon.

On voit donc qu'en partant des valeurs conformes à la pratique pour $f'$, $f''$ et $e$ on arrive à un poids de régulateur très modéré. Si la machine avait plusieurs centaines de chevaux, il serait difficile de faire tenir une surcharge suffisante au-dessus du manchon, avec un régulateur

n'ayant que $0^m,60$ de hauteur; mais il faut observer que le plus souvent une partie de la surcharge du manchon est placée autrement, sous forme de surcharge ou contrepoids qu'on peut faire varier à volonté quand on désire modifier la vitesse de régime. On peut encore employer, si on le préfère, le régulateur de la *fig.* 10 (Pl. VII), qui, à égalité d'écart relatif de vitesse, exige des dimensions beaucoup plus grandes; c'est ce que l'on fait le plus habituellement pour les machines de grande puissance.

Si l'on employait une course $c$ du manchon plus faible que 0,06, les formules donneraient un volant plus faible et un régulateur plus puissant.

Dans le cas où le régulateur ne serait pas du type de Porter, mais du type de Watt ou de Farcot, les sept formules précédentes seraient les mêmes, sauf les modifications suivantes, tenant à ce que P ou le poids des boules ne serait plus négligeable par rapport au poids Q du manchon.

La formule (4) devient alors la formule (4′) suivante du § 19, $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval :

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}} \times \sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\,\frac{b}{a} + Q}}.$$

Le dernier radical peut se mettre sous la forme :

$$\sqrt{\frac{1 + 2A\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{1 + A\,\frac{b}{a}}},$$

A étant le rapport $\frac{P}{Q}$ qu'on se fixe arbitrairement.



La formule (6) devient la formule (6′) suivante :

$$Q = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu Ec\left(A\,\frac{b}{a} + 1\right)}.$$

Enfin, la formule (7) devient la formule (7′) suivante :

$$F = 2\mu E\left(P\,\frac{b}{a} + Q\right) = 2\mu EQ\left[1 + A\,\frac{b}{a}\right] = \frac{(f' + f'')e}{\lambda c}.$$

§ 37. — **Marche des calculs avec régulateurs à ressorts.** — Nous allons passer maintenant au cas du régulateur à boules, tournant à grande vitesse, avec surcharge du manchon et à ressort; c'est le cas du régulateur de la *fig.* 9 (Pl. VII), qui a un grand intérêt pratique, comme je l'ai dit plus haut et comme on va le voir. Toutes les formules du paragraphe précédent s'appliquent, sauf les suivantes, qui sont modifiées.

La formule (4) devient (4′), ou (V. § 21) :

$$\tfrac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval, } y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q}{Q + R}}$$

(Q, poids du manchon, et R, compression moyenne du ressort). On tire de cette formule une conclusion capitale, c'est que plus R est grand, plus la $\frac{1}{2}$ force vive du volant sera faible ; or, en général, avons-nous dit, le deuxième genre de perturbations nécessite un volant plus fort que les autres genres de perturbations, comme on l'a vu dans l'exemple numérique ; donc, en employant les régulateurs à ressorts puissants, le deuxième genre de perturbations disparaît à peu près complètement et s'efface à côté des perturbations du premier et du quatrième genres. En pratique, cela permettrait de régler parfaitement des machines avec un volant plus faible que ceux qu'on emploie actuellement.

Ou bien, ce qui vaut mieux, cela permettait d'employer une valeur de E plus faible et d'obtenir une régularisation bien meilleure avec un volant semblable à celui qu'on emploie actuellement dans l'industrie.

Si nous nous reportons aux § 5 et 7, nous trouvons tous les renseignements nécessaires pour déterminer les dimensions de ce régulateur, de manière à obtenir pour E la valeur donnée, sans arriver à des dimensions exagérées du régulateur.

Naturellement, dans ce cas, l'équation (1) du paragraphe précédent ne s'applique plus; les § 3 et 7 fournissent les renseignements nécessaires, je le répète.

(Pour le calcul de la puissance des régulateurs, voir § 28.)

Pour les régulateurs dans le volant, on suivra la même marche de calculs, en faisant usage des formules du § 21 et du § 28.

Ici se termine l'étude du régulateur des organes de réglage et du volant des machines Corliss ; on voit à quel point cette nouvelle méthode diffère de celle qui est encore employée par les constructeurs et enseignée un peu partout. Comme on le voit, elle permet de déterminer les dimensions de tous les organes.

*(La fin à la prochaine livraison.)*



# BULLETIN

## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE LA HONGRIE EN 1894 ET EN 1895.

Le tableau suivant résume, en quantités et en valeurs, les principaux éléments de la production minière et métallurgique de la Hongrie pour les deux années 1894 et 1895.

| NATURE DES PRODUITS | 1894 | | 1895 | |
|---|---|---|---|---|
| | Quantités | Valeurs | Quantités | Valeurs |
| | tonnes | francs | tonnes | francs |
| Houille | 1.037.332 | 13.454.586 | 1.068.046 | 13.932.070 |
| Lignite | 3.181.072 | 25.445.199 | 3.517.901 | 27.773.646 |
| Briquettes | 30.057 | 576.121 | 29.421 | 579.916 |
| Coke | 10.250 | 219.254 | 12.033 | 274.916 |
| Asphalte et huile minérale | 4.432 | 552.764 | 4.370 | 460.680 |
| Minerais de fer exportés | 237.476 | 1.412.457 | 350.575 | 3.882.993 |
| Minerais de manganèse export. | » | » | 2.881 | 10.893 |
| Fonte d'affinage | 312.148 | 27.705.657 | 322.206 | 29.151.923 |
| Fonte de moulage | 17.837 | 3.452.867 | 21.459 | 4.068.890 |
| Pyrite de fer | 74.619 | 792.796 | 66.683 | 617.369 |
| Acide sulfurique | 4.018 | 140.904 | 1.707 | 109.959 |
| Plomb | 2.113 | 728.687 | 2.277 | 798.240 |
| Litharge | 689 | 290.255 | 615 | 295.392 |
| Cuivre | 271 | 334.356 | 287 | 356.223 |
| Minerai d'antimoine | 1.266 | 169.771 | 1.240 | 163.174 |
| Antimoine (régule et métal) | 385 | 307.866 | 465 | 350.547 |
| Minerai de nickel et de cobalt | 25 | 20.022 | 55 | 52.320 |
| Alliages id. | 23 | 23.154 | 18 | 13.410 |
| Mercure | 2 | 11.606 | 1 | 5.742 |
| Bismuth | 28 | 6.224 | 7 | 8.165 |
| Soufre | 93 | 19.288 | 102 | 19.330 |
| | kilog. | | kilog. | |
| Or | 2.687 | 11.109.139 | 3.187 | 12.028.799 |
| Argent | 20.155 | 3.006.449 | 20.432 | 3.042.012 |

La valeur totale, en comptant quelques autres produits non inscrits au tableau qui précède, s'est élevée à :

90.895.508 francs en 1894
et à 98.167.601 — en 1895.

La superficie des mines concédées était la suivante pour chacune des deux années considérées :

| | 1894 | 1895 |
|---|---|---|
| Mines de l'État..... | 8.625 hectares | 9.726 hectares. |
| Mines privées..... | 60.177 — | 61.564 — |
| Soit, en tout..... | 68.802 | 71.290 |

se répartissant comme suit :

| | | |
|---|---|---|
| Mines de charbon..... | 58,0 p. 100 | 58,6 p. 100 |
| — d'or et d'argent..... | 19,5 — | 19,2 — |
| — de fer..... | 17,5 — | 17,1 — |
| Autres mines..... | 5,0 — | 5,1 — |

Le nombre des ouvriers employés a été de :

| | 1894 | 1895 |
|---|---|---|
| Hommes..... | 52.674 | 54.859 |
| Femmes..... | 4.770 | 2.491 |
| Enfants..... | 5.139 | 4.981 |

Au point de vue des accidents, on a compté, pour 10.000 ouvriers :

| | 1894 | 1895 |
|---|---|---|
| Tués..... | 17 | 12 |
| Blessés grièvement..... | 27 | 24 |
| Blessés légèrement..... | 69 | 77 |

(*Extrait de l'*OEsterreichische Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen.)



ECOLE NATIONALE DES MINES Entrée BIBLIOTHÈQUE 1 bis

# RÉGULATEURS

## ORGANES DE RÉGLAGE ET VOLANTS DES MACHINES

### THÉORIE DE LA CORRÉLATION DE CES APPAREILS ENTRE EUX

Par M. Georges MARIÉ,
Ingénieur chef de division de la Compagnie P.-L.-M., en retraite

(*Suite et fin*) (*).

## TROISIÈME PARTIE.

### CALCUL DU RÉGULATEUR, DES ORGANES DE RÉGLAGE ET DU VOLANT DANS LES MACHINES OU LE RÉGULATEUR AGIT SUR LA DISTRIBUTION AUTREMENT QUE PAR UN DÉCLIC.

I. — § 38. — Nature de la distribution de ces machines.

On peut concevoir des machines dans lesquelles la distribution soit assez douce pour être mise directement par le régulateur autrement que par un déclic, bien que ces machines soient peu répandues.

La distribution de Farcot, déjà ancienne, a été, si je ne me trompe, la première à réaliser ces conditions, et bien avant l'invention des machines Corliss. Je ne donnerai pas ici la description de cette distribution, qui est très connue. Cette machine, employée avec un régulateur

(*) Voir *suprà*, p. 391 à 494.

quelconque, donne une bonne régularisation; avec le régulateur de Farcot, qui a été imaginé pour aller avec, elle donne aussi de bons résultats, mais à condition, bien entendu, d'employer ce régulateur dans la région où il n'est pas isochrone, comme je l'ai expliqué dans la théorie du régulateur Farcot.

Je ferai cependant à ce sujet une observation : pour que la marche du régulateur soit bonne, il faut que la came ne puisse pas tourner sous l'influence des chocs des tiroirs mobiles ; sans cela, le manchon du régulateur recevrait des chocs intenses qui troubleraient le fonctionnement du régulateur.

Si cette condition est remplie, le régulateur n'a à vaincre d'autre effort que celui du presse-étoupe de l'axe de la came ; ce léger frottement peut suffire à remplacer le frein à huile, qui devient alors inutile. On peut remplacer, avec avantage, le presse-étoupe par une garniture métallique très douce.

Il existe un certain nombre de machines ayant des distributions analogues.

Il faut classer dans cette troisième partie les machines à marche rapide avec régulateur dans le volant agissant directement sur la distribution en modifiant le calage de l'excentrique ; leurs tiroirs sont équilibrés.

On doit aussi rattacher à cette troisième partie certains modèles modernes de machines Corliss, qui, quoique étant à déclic, n'ont pas le mouvement de déclic réversible ; dans ces machines le choc du déclic n'influence pas le régulateur ; c'est comme s'il n'existait pas.

### II. — § 39. — Calcul du volant et du régulateur.

Les formules établissant la corrélation entre le volant et le régulateur et, par suite, le calcul de l'un et de l'autre, sont les mêmes que dans la deuxième partie.



Cependant il n'y a pas lieu de tenir compte ici de la réaction d'un organe de déclic qui n'existe pas; la puissance du régulateur se calcule seulement par la formule du § 23 ; mais alors F désigne non seulement les frottements du régulateur lui-même, mais encore celui de l'organe de réglage de la distribution, évalué, comme toujours, au manchon du régulateur.

---

# QUATRIÈME PARTIE.

## CALCUL DU RÉGULATEUR DES ORGANES DE RÉGLAGE ET DU VOLANT DANS LES MACHINES OU LE RÉGULATEUR AGIT DIRECTEMENT SUR UNE VALVE OU SOUPAPE.

---

### I. — Avantages et inconvénients des valves et soupapes ordinaires.

§ 40. — **Avantages et inconvénients au point de vue des qualités générales de la machine à vapeur.** — La grande vogue des machines Corliss tient à ce qu'on leur attribue généralement une grande supériorité sur les machines réglées par une valve, d'abord au point de vue de l'économie de combustible, ensuite au point de vue de la régularité de vitesse. Nous allons examiner tour à tour ces deux considérations.

Au point de vue de l'économie de combustible, le régulateur agissant sur la détente a l'avantage d'employer toujours la pression maxima de vapeur, même quand la

travail résistant diminue notablement. Or, on sait que, d'après le cycle de Carnot, le rendement thermique est proportionnel à :

$$\frac{T - t}{a + T},$$

T, température dans la chaudière ;

$t$, température au condenseur, ou bien 100° ; s'il n'y a pas condensation, $a = 273°$.

Cependant l'avantage de la distribution variable est moins grand qu'on pourrait le croire, parce que, dans ce cas, la détente est exagérée pour les faibles valeurs du travail moteur ; cela favorise les condensations à l'admission, qui sont désastreuses pour l'économie de combustible ; il faut, pour les éviter en partie, employer les chemises de vapeur autour des cylindres. Je crois donc que la distribution variable ne donne un avantage sur la valve qu'autant que les cylindres sont munis de chemises de vapeur.

Il est probable que le meilleur système, au point de vue économique, serait de faire agir en même temps le régulateur sur la distribution et sur la valve, ce qui serait, non pas impraticable, mais trop compliqué.

Mais, en laissant de côté cette question encore un peu obscure, il faut reconnaitre qu'il y a deux cas où les régulateurs à valve ou à soupape s'imposent presque ; ce sont les suivants :

1° Cas des machines tournant à très grande vitesse, comme les machines montées directement sur les dynamos ;

2° Cas des machines vieilles qu'on veut utiliser en les munissant d'un bon régulateur.

§ 41. — **Avantages et inconvénients au point de vue de la régularisation de la vitesse.** — Examinons à présent le second point de vue ; peut-on obtenir une aussi bonne régularisation avec le régulateur à valve qu'avec les machines



Corliss? On va voir que oui ; mais, comme on le verra, il faut employer un volant beaucoup plus fort avec les valves ordinaires qu'avec les machines Corliss, et un peu plus fort seulement avec les valves établies comme l'indique mon mémoire de 1887. Je considère donc les principes exposés dans ce mémoire comme ayant une grande importance pratique ; on obtient, d'ailleurs, un succès complet en appliquant ces principes dans la pratique.

La question ayant une grande importance, je vais la développer complètement ici, et j'en déduirai les formules nouvelles servant à calculer le volant avec les régulateurs établis dans ces conditions.

La valve ordinaire a le grand avantage d'être douce à mouvoir et facile à actionner directement par le régulateur, surtout en munissant son axe d'une garniture métallique connue, comme je l'ai indiqué dans mon mémoire de 1887. Mais elle a, comme les soupapes équilibrées, l'inconvénient majeur suivant :

Dans toute la deuxième partie du mémoire, nous avons admis la sixième hypothèse de la théorie des régulateurs à maximum et minimum ; en d'autres termes, nous avons supposé que les déplacements du manchon du régulateur donnaient lieu à des variations proportionnelles du travail moteur. Cette condition est assez bien réalisée dans les régulateurs agissant sur la distribution ; elle a été admise implicitement dans toutes les formules de la deuxième partie ; en effet, nous avons admis que les diverses perturbations de la position du manchon étaient négligeables quand elles ne dépassaient pas une certaine fraction de la course du manchon, $\frac{1}{4}$ par exemple. Mais, si à un déplacement du manchon, de $\frac{1}{4}$ de sa course totale, correspondait une variation de moitié ou davantage, dans la force motrice, la perturbation ne serait plus négligeable.

Nous allons voir que c'est précisément ce qui se passe avec les valves ou soupapes ordinaires.

Soit $s$ la section laissée libre par la valve pour le passage de la vapeur ; je montrerai que, si l'on fait croître $s$ depuis zéro (fermeture de la valve) jusqu'à son maximum (ouverture de la valve), les variations de $s$ sont très loin de donner lieu à des variations correspondantes du travail moteur ; il en est de même pour les variations de la position du manchon du régulateur ; pour une même augmentation $ds$ de la section libre, l'augmentation du travail moteur est d'autant plus grande que la valve est plus voisine de la fermeture. Il en est de même pour les variations correspondantes de la position du manchon. En d'autres termes, je vais montrer que, si nous considérons une machine de 100 chevaux, réglée par un régulateur à valve ayant une course de manchon de 6 centimètres, un déplacement de 1 centimètre seulement dans la position du manchon pourra très bien donner une variation de 25 chevaux dans le travail moteur, si le manchon est situé vers le haut de sa course, tandis que le même déplacement de 1 centimètre ne donnera que 5 chevaux de variation, si le manchon est situé vers le bas de sa course.

Nous insistons tout particulièrement sur ce défaut inhérent aux valves et aux appareils d'obturation ordinaires, car, en n'en tenant pas compte, on s'expose à un insuccès complet dans la régularisation de la machine.

Il me reste à signaler un inconvénient beaucoup plus grave que présentent presque tous les régulateurs à valve existants.

Dans ces appareils la valve est incapable de fermer hermétiquement, lorsque le manchon est en haut de sa course.

Ce défaut est souvent involontaire et résulte de ce qu'il est très difficile de construire une valve fermant bien, surtout si cette valve est trop grande, comme on le fait



presque toujours en croyant bien faire. Souvent même on le fait exprès, en disposant les leviers pour empêcher la valve de se fermer tout à fait quand le manchon est en haut de sa course. Il en résulte que, lorsque la machine tourne à vide, par suite de la chute de la courroie principale, la vitesse s'accélère de manière à devenir dangereuse au point de vue de l'explosion du volant. Il arrive même souvent que la valve ferme si mal que, lorsque la machine marche à pleine charge, la vitesse ne ralentit même pas quand on tire sur le levier pour fermer la valve à la main. Les valves qui ne ferment pas ont, comme on le verra, l'avantage de diminuer beaucoup les perturbations du deuxième genre et du quatrième genre et de permettre l'emploi de volants très petits ; mais, dans ces conditions, on n'a plus qu'un simulacre de régulateur, et c'est ce qui a fait la mauvaise réputation des régulateurs à valve.

Dans tout ce qui va suivre, je ne m'occuperai que des valves qui ferment assez bien pour que la vitesse ne sorte pas des limites fixées, même quand la machine tourne à vide ; j'ai indiqué, dans mon mémoire de 1887, la manière d'ajuster les valves pour y arriver.

## II. — Théorie de la corrélation entre le régulateur, la valve ou soupape équilibrée et le volant ; calcul de ces organes.

(Cette théorie nouvelle est exposée aux § 42 à 47 suivants, je l'ai imaginée à la suite des recherches que j'ai faites depuis 1887 et pour répondre à la question posée par l'Académie.)

§ 42. — **Variation de la force motrice de la machine en fonction du déplacement du manchon du régulateur.** — Avant de donner la théorie de la corrélation entre le volant et le régulateur agissant sur une valve ou soupape,

il convient d'étudier de plus près les variations de la force motrice de la machine en fonction de la position du manchon du régulateur.

La *fig.* 1 (Pl. X) représente une valve équilibrée ordinaire ; je suppose que le régulateur agisse directement sur un semblable appareil. La *fig.* 6 représente la course du manchon, que je suppose divisée, par exemple, en cinq parties égales, à partir du haut de cette course ; soient $M_a$, $M_b$, ..., $M_f$, les positions correspondantes du manchon. Je me propose de tracer une courbe OAB (*fig.* 2) ayant pour abscisses les positions du manchon et pour ordonnées les puissances en chevaux de la machine. Voici comment il faudrait s'y prendre pour tracer cette courbe exactement pour une machine donnée.

Prenons la position $M_e$ du manchon, par exemple ; à cette position correspond une certaine position de la valve, parfaitement connue d'après la disposition des leviers reliant le manchon à la valve ; il en résulte une section libre $S_e$ que la valve laisse au passage de la vapeur, section également connue.

Connaissant $S_e$, on peut en conclure la puissance en chevaux correspondante de la machine, en supposant que la machine continue à marcher indéfiniment avec cette même section libre $S_e$ de la valve. Pour y arriver, il faut construire, point par point, théoriquement, le diagramme du travail moteur sur le piston, la section libre de la valve restant constante et égale à $S_e$.

En construisant un diagramme analogue pour chacune des sections libres $S_a$, $S_b$, ..., $S_f$, correspondant aux diverses positions du manchon, le problème serait résolu. Mais, la construction de ce diagramme demandant des calculs très longs, je vais indiquer une méthode approchée pour construire la courbe OAB, méthode qui est parfaitement suffisante ; voici en quoi elle consiste :

Je représente par la *fig.* 7 (Pl. X) l'étranglement que



la valve occasionne à la vapeur. Soit $p_1$ la pression de la vapeur en amont de l'étranglement ou pression dans la chaudière ; soit S la section du tuyau supposée assez grande pour que la vitesse de la vapeur y soit négligeable ; soient $s$ la section offerte par la valve au passage de la vapeur, et W la vitesse de la vapeur au moment où elle passe dans la section $s$ ; soit $p_2$ la pression *moyenne* de la vapeur, en aval de l'étranglement pendant toute la durée de l'admission ; c'est aussi la pression *moyenne* de la vapeur dans le cylindre pendant l'admission, le tuyau ayant une section assez forte pour que la perte de charge de la vapeur y soit négligeable.

Appliquons les formules de l'écoulement de la vapeur ; on a :

$$W^2 = f(p_1, p_2)$$

($f$ désignant une fonction connue).

Soit D le débit moyen en volume de la vapeur par seconde, considéré pendant la période de l'admission, débit mesuré à la pression $p_2$ ; il est évident que ce débit est le même, quelle que soit la valeur de la section $s$, puisque la vitesse de la machine est constante et que le degré d'admission est constant, comme dans toutes les machines réglées par une valve.

Or, ce débit D est égal à $W \times s$ ; on a donc :

$$D = Ws = K \quad (K \text{ désignant une constante}),$$

ou bien :

$$W^2 s^2 = K^2,$$

ou :

$$W^2 = \frac{K^2}{s^2}.$$

Remplaçons $W^2$ par sa valeur dans l'équation ci-dessus. On a :

$$f(p_1, p_2) = \frac{k^2}{s^2};$$

d'où :

$$s^2 = \frac{k^2}{f(p_1.p_2)};$$

d'où :

$$s = \frac{k}{\sqrt{f(p_1.p_2)}}.$$

Cette formule permet de construire une courbe en prenant pour abscisses les valeurs variables de $p_2$, et pour ordonnées les valeurs de $s$ correspondantes (cette courbe n'est pas représentée sur les planches) ; or, il faut remarquer que les valeurs de la section libre de la valve, ou $s$, sont sensiblement proportionnelles aux déplacements du manchon, avec la disposition habituelle des leviers des valves ; la courbe dont nous venons de parler représente donc, à une constante près connue, les variations du déplacement du manchon en fonction de $p_2$.

En réalité, les valeurs de $s$ ne sont pas tout à fait proportionnelles aux déplacements du manchon ; on peut, d'ailleurs, évaluer plus exactement la valeur de S en fonction de la position du manchon ; si l'on désigne par S la section du tuyau qui contient la valve, par $\alpha$ l'angle du plan de la valve avec l'axe de ce tuyau, et par $\alpha_0$ cet angle, la valve étant fermée, on a naturellement :

$$s = S(\sin\alpha - \sin\alpha_0).$$

La disposition des leviers donne la valeur de $\alpha$ pour chaque position du manchon. Il est facile de tenir compte de cette relation pour construire plus exactement la courbe en question, mais c'est le plus souvent inutile.

Cela posé, il est facile de construire par points la courbe OAB (*fig.* 2) ; en effet, pour chaque position du manchon on cherche la valeur de $p_2$ d'après la courbe dont nous venons de parler ; avec le degré d'admission constant de la machine, on en conclut le diagramme du travail moteur correspondant. Le calcul peut, d'ailleurs,



être simplifié, en admettant que la force en chevaux de la machine est proportionnelle à la pression $p_2$ de la vapeur à l'admission, ce qui n'est pas loin de la vérité.

La courbe OAB de la *fig.* 2 a été construite à l'échelle pour une machine sans condensation avec une chaudière à 7 atmosphères et avec une valve équilibrée ayant les dimensions indiquées dans mon mémoire de 1887 ; pour une machine avec condensation, on applique la même formule, depuis la valeur $p_2 = 0$, au lieu de partir de $p_2 =$ pression atmosphérique. Il est, du reste, peu utile de construire cette courbe pour une machine à condensation ; en effet, dans ce cas, il est bien rare que le travail moteur soit assez faible pour que la pression à l'admission soit inférieure à la pression atmosphérique ; même quand la courroie tombe, il reste encore les résistances de la machine.

On voit sur la courbe OAB que les variations du travail moteur sont bien loin d'être proportionnelles à la section libre $s$ de la valve ; en d'autres termes, la sixième hypothèse de ma théorie des régulateurs à maximum et minimum n'est nullement réalisée. Pratiquement, l'inconvénient se traduira souvent par une instabilité désastreuse du régulateur, quand le manchon se rapproche de sa position de fermeture. C'est pour éviter cet inconvénient que certains constructeurs disposent la valve de manière qu'elle ne puisse se fermer complètement, moyen détestable, comme je l'ai dit ci-dessus, car les machines ainsi réglées s'emballent quand la machine tourne à vide, ce qui peut causer l'explosion du volant. Nous allons montrer qu'on peut éviter cet inconvénient soit en augmentant le volant, soit en modifiant la forme de la valve suivant les principes de mon mémoire de 1887.

§ 43. — **Théorie nouvelle de la corrélation.** — Maintenant que nous savons construire la courbe OAB, nous allons

voir que la théorie de la corrélation entre le volant et le régulateur, avec l'emploi d'une valve équilibrée, se rattache très facilement à celle que nous avons donnée pour la machine Corliss ; voici comment :

Nous venons de voir que la courbe OAB représente les variations de la force motrice en chevaux suivant la position du manchon du régulateur, avec une valve équilibrée ; les ordonnées ont été divisées en centièmes de la force motrice maxima.

Dans le cas des machines Corliss, au contraire, la courbe OAB devient la ligne droite OB, puisque, comme nous l'avons dit, les variations de la force motrice sont, dans ce cas, sensiblement proportionnelles aux déplacements du manchon.

Considérons une position du manchon voisine de la fermeture de la valve, la position $M_1$ qui est à $\frac{1}{5}$ de la course du manchon.

Comparons ce qui se passe dans les deux cas pour le déplacement $OM_1$ du manchon. L'ordonnée $M_0D$ est quatre fois plus grande que l'ordonnée $M_0C$ ; désignons par L le rapport des ordonnées $\frac{M_1D}{M_1C}$ ; donc avec la valve ce déplacement de $\frac{1}{5}$ de la position du manchon donne une force motrice de 20 p. 100 environ du maximum pour la machine Corliss, et une force motrice de 80 p. 100 environ du maximum pour la machine avec régulateur à valve. Si l'on prenait une autre position voisine de $M_1$ le résultat ne changerait pas sensiblement.

Reportons-nous maintenant au § 18, qui concerne les perturbations du deuxième genre. Si l'on appliquait ici la formule de ce paragraphe, qui donne la valeur de $y$, il est bien évident que l'effet de la même perturbation de la position du manchon serait ici beaucoup plus grave que dans



la machine Corliss, si elle se produit dans le voisinage de la fermeture de la valve, puisqu'un même déplacement du manchon produit une variation quatre fois plus grande de la force motrice ; que faut-il faire maintenant pour que cet effet ne soit pas plus fâcheux que pour la machine Corliss ? Il faut naturellement diminuer la perturbation elle-même dans une proportion que nous allons fixer.

Pour cela, reprenons la formule (4) du § 18, où :

$$y = \frac{1}{2}\ \text{force vive du volant par cheval} = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}.$$

On se rappelle que $\lambda$ et $\mu$ sont des fractions de l'unité qu'on prend d'autant plus petites qu'on veut rendre moindre la perturbation du deuxième genre.

Cela posé, pour que la perturbation du deuxième genre ne soit pas plus nuisible dans le régulateur à valve que dans les machines Corliss, il faut et il suffit que $\lambda$ soit L fois plus petit avec la valve qu'avec la machine Corliss ; en effet, dans ces conditions, le manchon sera arrêté sur une longueur L fois plus petite, ce qui correspondra à la même variation de force motrice qu'avec $\lambda$ dans la machine Corliss ; donc $\lambda$ devient ici $\frac{\lambda}{L}$ ; $\lambda$ peut être pris égal à 0,25 et $\mu = 33$, comme dans les machines Corliss ; ces chiffres n'ont rien d'absolu : plus on les choisira faibles, moins les oscillations seront visibles, et plus elles seront vite arrêtées.

(L est le rapport des ordonnées $\frac{M_1C}{M_1D}$, comme je l'ai dit ci-dessus.)

Ainsi la formule qui donne $y$ devient :

$$(1)\qquad y = 6\sqrt{\frac{c}{\frac{\lambda}{L}\times\mu\times E^3}} = 6\times\sqrt{L}\times\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}.$$

Cette formule est relative au régulateur de Porter ; pour le régulateur de Watt et Farcot-elle devient :

$$y = 6 \times \sqrt{L} \sqrt{\frac{c}{\lambda \mu E^3}} \times \sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q}},$$

d'après le § 19.

Donc la même formule est applicable, sauf que la $\frac{1}{2}$ force vive du volant est multipliée par $\sqrt{L}$; si $L = 4$, comme dans le cas de la courbe OAB, il faut donc employer un volant deux fois plus puissant avec le régulateur à valve qu'avec les machines Corliss, ou bien diminuer la valeur de E, ce qui diminue la précision de la régularisation. Ce résultat est extrêmement important, puisqu'il résume la théorie de la corrélation pour les régulateurs agissant sur une valve ou soupape équilibrée.

La formule donnant la $\frac{1}{2}$ force vive du volant pour les perturbations du premier genre n'est pas modifiée ; seulement elle perd ici toute importance et sera toujours vérifiée d'elle-même, car la formule précédente est celle qui exige le plus grand poids de volant ; on peut s'en assurer en faisant des applications numériques.

Examinons l'effet des perturbations du troisième genre.

On calculera la puissance du régulateur par la formule habituelle :

$$(2) \quad \frac{dn}{n} = \mu E = \frac{F}{2\left[P\frac{b}{a} + Q\right]}; \quad \text{d'où :} \quad P\frac{b}{a} + Q = \frac{F}{2\mu E}$$

(F désignant le frottement de l'axe de la valve évaluée au manchon).

Mais ici j'ai à faire une remarque importante :

Il faut que la puissance du régulateur $P\frac{b}{a} + Q$ soit



calculée aussi exactement que possible par cette formule, mais il ne faut pas que le régulateur soit trop puissant ; en effet, F désigne ici la valeur du frottement considéré comme frein, ainsi que je l'ai expliqué aux § 19 et 21, ce frein remplaçant ici le frein à huile des machines Corliss.

Si le régulateur était trop puissant, les conditions de ma théorie ne seraient plus remplies, et le régulateur deviendrait sujet aux oscillations. On pourrait encore employer un régulateur trop puissant avec un frein à huile, mais c'est une complication absolument inutile dans ce cas.

Examinons, enfin, l'effet des perturbations du quatrième genre.

Les formules des § 30, 31 et 32 s'appliquent ici, mais avec les deux modifications suivantes :

1° Il faut d'abord multiplier par le coefficient L le deuxième membre de la formule qui donne la $\frac{1}{2}$ force vive par cheval, eu égard aux perturbations du quatrième genre. Reportons-nous, en effet, à l'étude de ces perturbations pour le cas des machines Corliss (§ 30) ; nous avons vu que, si le travail résistant varie de $\frac{1}{n}$ de son maximum, le manchon saute de $\frac{1}{n}$ de la course totale, et que la variation du travail moteur reste toujours appropriée aux besoins ; mais ceci suppose implicitement que les variations du travail sont proportionnelles aux déplacements du manchon, condition qui est sensiblement réalisée, comme on l'a vu, avec les machines Corliss, et non avec les régulateurs à valve. Or, nous désirons qu'avec le régulateur à valve un même soubresaut du manchon ne donne pas une perturbation plus grande qu'avec les machines Corliss ; pour cela, il faut et il suffit que la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval soit L fois plus grande ; il faut

donc ici multiplier par L le deuxième membre des équations relatives aux perturbations du quatrième genre, L ayant la même signification que ci-dessus ;

2° Il faut, en outre, multiplier ce deuxième membre par un autre coefficient, comme je vais l'expliquer. Ici la quantité de vapeur emprisonnée, sur laquelle la valve n'a pas d'action, est égale, non seulement à la vapeur admise dans le cylindre pendant l'admission, mais encore à la quantité de vapeur comprise entre la valve et le cylindre ; si donc je désigne par K le rapport de ce volume à celui de l'admission maxima, on voit que la $\frac{1}{2}$ force vive doit être multipliée par $(1 + K)$ ; on aura donc, en définitive, les formules suivantes :

1° Machine à cylindre unique :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 19 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}(1 + k) \times L;$$

2° Machine à deux cylindres à 90° :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 9{,}5 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}(1 + k) \times L;$$

3° Machine compound :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive du volant par cheval} = 14 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}(1 + k) \times L.$$

J'ai déjà signalé, dans mon mémoire de 1878, la perturbation ci-dessus due à $k$.

En résumé, comme on le voit, j'ai rattaché complètement la théorie de la corrélation dans les régulateurs à valve à celle que j'ai donnée pour les machines Corliss.

On peut se demander si les trois formules précédentes, avec leurs coefficients $(1 + k)$ et L ne donneront pas des valeurs un peu fortes pour le poids du volant ; il n'en est rien pour les motifs suivants :



D'abord nous avons vu que, à part le cas des régulateurs à ressorts, les formules relatives aux perturbations du quatrième genre donnent pour le volant un poids sensiblement inférieur à celui que donnent les perturbations du deuxième genre, avec les machines Corliss ; mais, de plus, il faut remarquer que les régulateurs à valve ne s'emploient plus guère que pour des machines à grande vitesse ou à plusieurs cylindres, ce qui réduit sensiblement le poids du volant donné par les formules précédentes. Si, par exception, on installe un régulateur à valve sur une machine à cylindre unique à marche lente, les formules précédentes montrent qu'il faudra réduire, le plus possible, les coefficients $(k + 1)$ et L pour éviter l'emploi d'un volant trop fort ; or, on peut réduire $(k + 1)$ autant qu'on veut, en mettant la valve très près des cylindres ; de plus, on verra au paragraphe suivant que, pour réduire L le plus possible, il faut employer une valve aussi petite que possible. Mais ce qu'il faut surtout faire, c'est employer la valve à stabilité variable, qui permet de diminuer sensiblement le volant, comme on le verra plus loin.

On peut me faire l'objection suivante : il existe dans l'industrie une foule de machines réglées par un régulateur à valve équilibrée de grande dimension, munies d'un très petit volant et qui ne sont nullement sujettes aux oscillations du manchon du régulateur. Je rappellerai que ces machines ont une valve qui ne ferme pas et n'ont, par suite, qu'un simulacre de régulateur ; on peut s'en assurer en faisant marcher la machine à vide ; on se trouve alors dans le cas signalé à la fin du § 41.

Quelquefois certains mécaniciens empêchent les oscillations du manchon en tenant toujours un peu fermé le robinet d'admission que possède toute machine en amont de la valve ; j'ai montré, dans mon mémoire de 1878, l'influence régulatrice de cet artifice.

On conçoit parfaitement que, avec une valve qui ne ferme pas, la courbe OAB se rapproche beaucoup d'une ligne droite, ce qui permet de diminuer beaucoup le volant. On peut même le faire beaucoup plus petit que dans les machines Corliss, si la valve ferme très mal, car le travail moteur ne peut plus varier qu'entre des limites très restreintes, voisines de son maximum.

Je pourrais faire la théorie de la corrélation avec des valves qui ne ferment pas, mais elle serait assez compliquée, et c'est inutile, puisque ces appareils sont mauvais et ne doivent pas être employés; ce qu'il faut employer, je le répète, c'est la valve à stabilité variable, dont je parlerai plus loin.

§ 44. — **Influence de la grandeur de la valve ou soupape sur le poids à donner au volant** (signalée dans mon mémoire de 1887). — La courbe OAB a été tracée, comme je l'ai dit, en prenant le cas d'une machine sans condensation, avec 7 atmosphères de pression dans les chaudières et avec une valve équilibrée de dimensions modérées et conforme aux indications de mon mémoire de 1887.

Cela correspond à une valve qui, étant ouverte en grand, laisse passer la vapeur avec une vitesse maxima de 100 mètres par seconde, qui donne environ $\frac{1}{20}$ d'atmosphère de perte de charge à l'admission pour le travail maximum.

Dans ces conditions, on obtient L = 4 environ, comme le montre la figure. Mais on va voir que L varie considérablement suivant la grandeur de la valve employée ou, plus exactement, suivant la section maxima qu'elle laisse au passage de la vapeur quand la force motrice de la machine est à son maximum.

En effet, supposons qu'on emploie une valve plus petite que celle qui a servi à établir la courbe OAB. Il



est évident que, pour une même position M$b$ du manchon du régulateur, la section libre de la valve sera plus petite, d'où il résulte que la pression à l'admission sera plus faible, ainsi que le travail moteur; on obtiendra alors une courbe OA'B qui montera moins vite que la courbe OAB; alors le rapport L' devient le rapport $\frac{M_bE}{M_bC}$, rapport sensiblement plus petit que L; dans le cas de la figure, on a avec cette petite valve L = 3, au lieu de L = 4 du cas précédent. Donc, d'après le paragraphe précédent, la demi-force vive du volant doit être diminuée, avec cette valve plus petite. Cette observation a une importance considérable et elle vient confirmer un fait bien connu de quelques constructeurs, à savoir que les régulateurs sont d'autant plus instables que les valves sont plus grandes. La conclusion, c'est qu'il faut employer des valves aussi petites que possible pour ne pas être obligé d'augmenter le volant démesurément.

Il en résulte un autre avantage, c'est qu'une petite valve donne moins de frottement qu'une grande et, par suite, exige un régulateur moins puissant.

La limite à la petitesse de la valve est celle qui donne une perte de charge trop forte, la valve étant ouverte en grand. J'ai dit ci-dessus que la courbe OAB correspond à une valve donnant 100 mètres de vitesse de la vapeur au maximum et $\frac{1}{20}$ d'atmosphère de perte de charge au plus avec le travail maximum; la courbe OA'B correspond environ à la vitesse de 200 mètres et à une perte de charge de $\frac{1}{5}$ d'atmosphère.

On voit donc combien il est important de renoncer à l'habitude vicieuse de faire des valves trop grandes.

J'ajouterai qu'il est indispensable de donner à la conduite de la vapeur de l'admission un diamètre sensible-

ment plus fort que celui du bout de tuyau qui contient la valve, pour éviter la perte de charge due au frottement de la vapeur. Il est bon de faire des raccordements coniques aux conduites.

La formule (1) du § 43 montre, en résumé, que si L est égal à 4 dans la pratique, il faudra un volant deux fois plus fort avec le régulateur à valve qu'avec une machine Corliss.

§ 45. — **Marche des calculs avec régulateurs à boules et à poids avec ou sans surcharge du manchon.** — La marche des calculs se déduit aisément des deux paragraphes précédents.

On choisit d'abord E suivant la nature de l'atelier, d'après le tableau que j'ai donné au § 35.

Puis, on calcule les dimensions du régulateur en conséquence (abstraction faite de sa puissance).

Puis, on calcule les dimensions de la valve, comme cela est indiqué ci-dessus ; pour y arriver on n'a qu'à appliquer la formule :

$$d = 0{,}16\sqrt{S \times V}\ ;$$

$d$, diamètre cherché du tuyau contenant la valve ;

S, section d'un piston de la machine ;

V, vitesse du piston au milieu de sa course (formule extraite de mon mémoire de 1887).

Cette formule correspond à $\frac{1}{20}$ d'atmosphère de perte de charge à l'admission, la valve ouverte en grand ; on peut même descendre jusqu'à $d = 0{,}08\sqrt{S \times V}$, qui correspond à $\frac{1}{5}$ d'atmosphère de perte de charge à l'admission.

Puis, on calcule la résistance F due au frottement de la valve, évaluée au manchon, par la formule :



$$F = 100\,\frac{d^3}{c}$$

($c$ est la course totale du manchon du régulateur).

Cette formule est extraite du même mémoire ; elle est basée sur des expériences que j'ai faites en mesurant au dynamomètre le frottement des valves établies suivant mes indications.

Puis, on calcule la $\frac{1}{2}$ force vive du volant et la puissance du régulateur comme je l'ai expliqué au § 43, en construisant la courbe OAB ou en se contentant de prendre $k = 4$, si l'on prend la grande valve donnant une perte de charge de $\frac{1}{20}$ d'atmosphère à l'admission pour le travail maximum.

§ 46. — **Marche des calculs avec régulateurs à boules et à ressorts.** — Ici, et plus encore que dans les machines Corliss, on a un extrême avantage à diminuer l'inertie du régulateur en employant les régulateurs à poids et à ressorts ; il faut même ici ne plus employer aucune surcharge du manchon ; en effet le manchon n'a plus à résister à un choc de déclic, et il faut en profiter pour réduire le plus possible l'inertie du régulateur.

La marche des calculs est absolument la même que dans le paragraphe précédent, mais la formule qui donne la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval est tirée, par analogie, du § 21, et non plus des § 18 et 19.

On a alors :

$$y = 6 \times \sqrt{L}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\,\frac{b}{a} + Q + R}}\ ;$$

Q est le poids du manchon ;

P, le poids de chaque boule ;

R, la compression du ressort ;

$\frac{c'}{c}$ est le rapport des chemins parcourus par une boule et par le manchon pendant la course totale de ce dernier.

On voit, d'après cette formule, qu'il y a un avantage considérable à employer des régulateurs à ressorts pour diminuer le poids du volant.

Les formules relatives aux perturbations du quatrième genre sont ici les mêmes naturellement qu'au § 43, c'est-à-dire les mêmes que pour les machines Corliss, avec les coefficients L et $(k+1)$.

On voit donc que, avec les régulateurs à ressorts, on peut employer un volant très faible, mais à la condition d'employer une valve de petite dimension et située très près des cylindres ; sans cela ce sont les formules relatives aux perturbations du quatrième genre, et non plus celles du deuxième genre qui nous obligeraient à l'emploi d'un volant puissant. Mais le mieux est d'employer la valve à stabilité variable dont je parlerai plus loin.

Pour finir, je dirai que l'un des meilleurs systèmes consiste à adopter les régulateurs dans le volant, que j'ai étudiés longuement au § 9 ; dans ce cas, la formule de la corrélation serait :

$$y = 6\sqrt{L}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{2R\left(\frac{c'}{c}\right)^2}},$$

R étant la compression de chacun des ressorts, agissant suivant les rayons. C'est en employant ce système avec des valves ou soupapes équilibrées que beaucoup de constructeurs obtiennent des machines bien réglées déjà, et cela avec des volants très modérés. Mais je vais montrer qu'on peut faire mieux encore ou employer un volant plus



faible en appliquant les principes de mon mémoire de 1887 pour la construction des valves et des soupapes.

## III. — Valves et soupapes a stabilité variable.

§ 47. — **Compensation des valves par un système de leviers.** — Pour compenser l'inconvénient des valves, j'ai proposé, en 1878, d'employer le système de leviers à genoux représenté sur la *fig.* 5 (Pl. X) ; le système s'explique de lui-même ; il permet d'obtenir des variations du travail à peu près proportionnelles aux déplacements du manchon ; ces leviers sont d'un réglage un peu délicat.

§ 48. — **Compensation des vannes par des orifices en pointe.** — Dans mon mémoire de 1878, j'ai proposé de donner une forme en pointe aux orifices des vannes d'admission d'eau ; c'est toujours la même idée.

§ 49. — **Valve à stabilité variable.** — Voici, enfin, quel est l'appareil le plus pratique pour compenser cet inconvénient des valves :

La *fig.* 1 (Pl. X) représente une valve équilibrée sous l'action de la vapeur ; c'est le type de valve qui est considéré généralement comme parfait. Les épaisseurs ont été grossies sur le dessin pour faciliter les explications. Dans cet appareil le centre de l'axe de rotation se trouve exactement dans le plan AB de la face de la valve, du côté de l'arrivée de vapeur, ce qui caractérise la valve équilibrée.

La *fig.* 2 (Pl. X) représente une valve défectueuse, très répandue cependant dans la pratique ; l'axe est situé au milieu de l'épaisseur de la valve ; cette valve n'est pas équilibrée ; elle a une tendance à se coller quand elle est

fermée ; en effet, menons par le centre de l'axe une perpendiculaire au plan de la valve ; soit D son intersection avec la face de la valve ; il est clair que AD est plus grand que DB, de sorte que l'action de la vapeur tend à produire la fermeture de la valve ; il en résulte que, si une oscillation du régulateur due à une cause quelconque amène la valve dans le voisinage de sa fermeture, elle se collera d'elle-même et restera collée malgré l'action du régulateur ; la machine se ralentira démesurément jusqu'à ce que la valve se décolle tout d'un coup ; alors le manchon du régulateur retombera lourdement de toute sa course, puis la machine s'accélérera rapidement, la valve se collera de nouveau, et ainsi de suite. Ainsi s'expliquent un grand nombre d'insuccès obtenus avec les régulateurs à valve ; on attribue le plus souvent au régulateur ce grave inconvénient, et le défaut de la valve elle-même passe presque toujours inaperçu.

La *fig.* 4 (Pl. X), au contraire, représente une excellente disposition, que j'ai appelée, en 1887, *valve à stabilité variable*. C'est tout simplement une valve équilibrée dans laquelle on a donné un léger coup de lime AC sur l'arête située du côté de l'arrivée de vapeur ; ce coup de lime va en mourant des deux côtés jusqu'à l'axe de la valve, où il se réduit à zéro (Voir les figures de mon mémoire de 1887).

Une telle valve n'est pas équilibrée ; elle présente une tendance à l'ouverture ; en d'autres termes, lorsque, par une circonstance accidentelle, la valve a été fermée, elle se rouvre légèrement d'elle-même, et on évite ainsi les oscillations dont nous venons de parler. Mais il y a mieux : la valve qui représente une légère tendance à l'ouverture est bien préférable à la valve équilibrée de la *fig.* 1. En effet, cette tendance, qui est assez forte lorsque la valve est voisine de sa fermeture, va sans cesse en diminuant à mesure que la valve s'ouvre davantage ; c'est donc, en



quelque sorte, un dispositif qui donne au système de la valve et du régulateur une *stabilité* d'autant plus grande que cette valve est plus voisine de sa fermeture.

Cette particularité vient très heureusement compenser le défaut de la valve dont nous avons parlé ci-dessus. Cet artifice est depuis longtemps employé dans certains ateliers, où l'on a remarqué que les valves avaient généralement une tendance à rester collées et où l'on a cherché les moyens de leur donner une tendance contraire.

On emploie aussi quelquefois un autre procédé consistant à placer l'axe de la valve très légèrement au-dessus de son plan d'amont AB ; on obtient également ainsi une valve qui tend à se décoller. Ces deux tours de main, bien que très peu connus, ont, je crois, une origine très ancienne, mais tous les constructeurs n'en comprennent pas l'importance, et l'on va voir comment ils permettent de réduire le volant. On peut les employer simultanément. L'importance à donner au coup de lime peut se calculer comme on le verra plus loin ; mais les personnes peu habituées aux calculs peuvent se contenter d'opérer ainsi qu'il suit : on commence par donner un léger coup de lime et on essaie la valve dans la pratique, en faisant varier le travail de l'atelier ; puis, si le régulateur est encore sujet aux oscillations, on retire la valve et on augmente le coup de lime, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive à obtenir un régulateur assez stable pour que le manchon revienne rapidement à l'immobilité, après qu'on l'a brusquement dérangé de sa position. Mais, je le répète, au lieu de régler pratiquement le coup de lime, je montrerai comment on peut le calculer théoriquement, ce qui vaut beaucoup mieux pour se rendre compte de ce que l'on fait.

§ 50. — **Soupape à stabilité variable.** — La valve établie exactement suivant les dessins de mon mémoire

de 1887, avec sa garniture métallique, est, à mon avis, le meilleur et le moins encombrant des obturateurs pour les machines puissantes. Mais, pour les petites machines, l'application exacte de mes calculs conduit à des dimensions très petites de la valve, si petites même que la valve devient un organe délicat. On tourne souvent la difficulté, en mettant aux petites machines des valves trop grandes; mais le moyen est détestable, comme on l'a vu au § 44. On pourrait s'en tirer en employant une valve un peu trop grande et en n'employant qu'un petit angle de rotation de la valve, pour la course totale du manchon; mais alors il resterait toujours deux inconvénients, c'est que la valve trop grande fermerait mal et donnerait des frottements relativement importants qui exigeraient l'emploi d'un régulateur un peu puissant.

Pour éviter ces inconvénients, j'ai imaginé, en 1887, un appareil que j'ai appelé *soupape à stabilité variable* et qui jouit des mêmes propriétés que les « valves à stabilité variable », dont je viens de donner la description. Je ne donne pas ici le dessin ni la description de cette soupape, on la trouvera dans mon mémoire précité de 1887 (V. Pl. VIII de ce mémoire). Cette soupape est destinée, suivant moi, à rendre des services dans la construction des petites machines à vapeur, qu'on veut régler avec une grande précision.

## IV. — Calcul du régulateur de la valve ou soupape a stabilité variable et du volant.

(J'ai imaginé cette nouvelle théorie pour répondre à la question posée par l'Académie; elle est exposée dans les § 51 à 54 suivants.)

§ 51. — **Étude de la corrélation.** — Nous avons vu que, en employant une valve ou une soupape ordinaire équilibrée,



les formules de la corrélation montrent qu'il faut employer un volant plus fort qu'avec les machines où le régulateur agit directement sur la distribution, comme les machines Corliss. Je vais montrer qu'avec l'emploi des valves et soupapes à stabilité variable, établies suivant les principes de mon mémoire de 1887, cet inconvénient est sensiblement diminué; ce fait a une importance considérable, au point de vue de la pratique, puisque cela permet ou d'employer un volant plus faible qu'avec les valves ordinaires, ou d'adopter une valeur de E plus faible, avec le même volant, ce qui rend la régularité plus parfaite.

Pour le montrer, revenons à la *fig.* 1 (Pl. X). Dans cette disposition, la valve est équilibrée, c'est-à-dire que le moment de la pression de la vapeur sur la demi-face AD est égal au moment de la pression de la vapeur sur la demi-face DB, les moments étant pris par rapport à O.

Mais, si nous passons à la *fig.* 4, on voit de suite que le moment de la demi-face CAD de la valve est inférieur au moment de la demi-face DB. Considérons ces moments, en supposant la valve fermée; la pression à considérer est ici la pression de la vapeur dans la chaudière évaluée au-dessus de la pression atmosphérique, si la machine est sans condensation, et au-dessus de zéro, si elle est munie d'un condenseur. Il est alors facile d'évaluer la différence de ces moments, lorsque la valve est fermée; en d'autres termes, étant donnée l'importance du coup de lime, il est facile de calculer l'effort à faire pour maintenir la valve fermée; j'évaluerai, comme toujours, cet effort au manchon du régulateur, et je le désigne par $\Phi_1$.

Cet effort $\Phi_1$ agit, naturellement, sur le manchon du régulateur et lui donne une tendance à s'éloigner de sa position supérieure, position dangereuse, au point de vue de sa stabilité, puisque nous avons vu que la force motrice varie très rapidement dans ce voisinage, pour un déplace-

ment donné du manchon. Mais examinons de plus près ce qui se passe ici.

La valeur de $\Phi_1$ correspond à la valve fermée, le manchon étant en haut de sa course ; mais nous allons voir maintenant comment varie $\Phi$ ou la réaction de la valve, sur le manchon, quand ce manchon se déplace du haut en bas de sa course.

Pour y arriver, il suffit de remarquer que $\Phi$ est proportionnel à la différence des pressions de la vapeur en amont et en aval de la valve. Considérons ici la pression moyenne de la vapeur pendant l'admission et la valeur moyenne de $\Phi$ qui en résulte, sans tenir compte des variations rapides de cette pression pendant l'admission.

Cela posé, il faut remarquer que la différence des pressions, en amont et en aval, est sensiblement proportionnelle à la force motrice de la machine, puisque le degré d'admission de la machine est constant, comme dans tous les régulateurs à valve. Donc la courbe qui donne les variations de la différence des pressions sur la valve est une courbe dont les coordonnées sont sensiblement proportionnelles à la courbe OAB (*fig.* 2, Pl. X). Donc la courbe OAB représente également les variations de $\Phi$, en fonctions de son maximum $\Phi_1$ (dont nous connaissons la valeur), quand le manchon se déplace de haut en bas.

$\Phi$ est une force évaluée au manchon, qui donne une perturbation relative de vitesse égale à :

$$\frac{dn}{n} = \frac{\Phi}{2\left(\mathrm{P}\frac{b}{a} + \mathrm{Q}\right)},$$

comme on le sait.

Donc, comme je l'avais annoncé, la valve a la propriété d'augmenter la stabilité du régulateur suivant les besoins ; en d'autres termes, le régulateur, en dehors de son écart relatif propre E, jouit d'un nouvel écart relatif de



vitesse, dû au coup de lime, et dont l'action se fait sentir surtout quand cela est utile, c'est-à-dire dans le voisinage de la fermeture de la valve.

Il ne m'est pas possible de donner, dans le cas de cette valve à stabilité variable, une théorie de la corrélation aussi précise que celle que j'ai donnée pour les machines Corliss et pour les valves équilibrées ordinaires. Mais je vais indiquer les règles empiriques auxquelles j'ai été amené par de longues recherches ; je montrerai ensuite théoriquement que les règles empiriques sont justifiées et qu'elles donnent un volant largement suffisant, pour éviter les oscillations du deuxième genre ; les formules sont donc encore basées sur la théorie pure.

Voici quelles sont ces règles empiriques :

On choisit E d'après le tableau du § 35, suivant la nature de l'atelier et comme s'il s'agissait d'une machine Corliss ;

Puis, on partage E en deux parties :

1° D'abord $\mathrm{E}_1 = \frac{\mathrm{E}}{2}$ que l'on assignera comme valeur à l'écart relatif propre du régulateur considéré isolément ;

2° Ensuite $\mathrm{E}_2 = \frac{\mathrm{E}}{2}$ qui sera l'écart relatif de vitesse du régulateur dû à l'influence du coup de lime, ce qui permet de calculer l'importance de ce coup de lime, d'après ce qui a été dit ci-dessus.

Quant à la valeur de $y$ ou $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval de force motrice maximum, on la calculera d'après la formule empirique :

$$y = 6\left[\frac{1+\sqrt{\mathrm{L}}}{2}\right] \times \sqrt{\frac{c}{\lambda \mu \mathrm{E}^3}},$$

c'est la moyenne des valeurs données pour les machines Corliss et pour les valves équilibrées,

Je suppose le régulateur du type de Porter ; il faut multiplier par les facteurs convenables, s'il s'agit du régulateur de Watt, de Farcot ou d'un régulateur à ressorts, comme aux § 19 et 21.

Telles sont les règles et la formule de la corrélation, en ce qui concerne les perturbations du deuxième genre ou les plus importantes ; on verra plus loin les règles pour les autres perturbations.

Je vais montrer maintenant que ces règles et cette formule se justifient par des considérations théoriques ou qu'elles donnent un volant largement suffisant pour éviter les perturbations du deuxième genre avec la soupape à stabilité variable.

En effet, considérons de nouveau l'oscillation du manchon la plus funeste, celle qui correspond au manchon lancé de bas en haut, et toujours dans l'hypothèse la plus défavorable, c'est-à-dire avec travail moteur maximum et travail résistant nul.

Je suppose, par exemple, qu'on prenne $\lambda = \frac{1}{4}$ et que $L = 4$, ce qui correspond à la dimension habituelle des valves suivant mes formules. Alors, une fois le manchon lancé de bas en haut, il sera arrêté, non seulement par le frein F, qui correspond à $\frac{E}{4}$, comme dans les machines Corliss, mais encore par la résistance $\Phi_1$ à la fermeture de la valve, due au coup de lime, et qui correspond à $\frac{E}{2}$ d'après ce qui précède.

Donc le frein total tendant à arrêter le manchon sera trois fois plus fort que dans le cas de la machine Corliss. Mais, d'autre part, la formule empirique précédente nous donne une valeur de $y$ un peu plus forte que pour la machine Corliss, en fonction de l'écart relatif de vitesse total E, ce qui diminuera la vitesse maxima et, par suite, à plus forte raison, la force vive maxima du manchon.



Donc le manchon sera très largement arrêté sur une longueur quatre fois plus faible que dans la machine Corliss, puisque le frein est déjà trois fois plus fort et que la $\frac{1}{2}$ force vive du manchon est sensiblement plus faible que dans le cas de la Corliss.

Puisque le manchon sera arrêté sur une longueur égale à peine à $\frac{1}{4}$ du cas de la machine Corliss, cela suffit largement pour éviter les oscillations du deuxième genre, puisque L est égal à 4, c'est-à-dire que les variations du travail moteur sont quatre fois plus rapides avec la valve qu'avec la machine Corliss (raisonnement pareil à celui du § 43 ci-dessus).

Donc, comme je l'avais annoncé, la valeur de $y$ est largement suffisante ; on pourrait même lui donner, d'après ce qui précède, une valeur légèrement inférieure, mais je préfère m'en tenir à cette formule prudente, à cause des difficultés d'exécution des valves et des aléas qui en résultent dans la pratique.

Cette théorie, je le répète, n'a pas la même précision que toutes celles qui précèdent, mais elle suffit néanmoins pour calculer le volant dans ce cas.

§ 52. — **Marche des calculs avec régulateurs à boules et à poids avec ou sans surcharge du manchon.** — Comme je l'ai dit dans le paragraphe précédent, on choisira l'écart relatif de vitesse totale E suivant la nature de l'atelier, en prenant le même chiffre que pour une machine Corliss ; puis, on adoptera $E_1 = \frac{E}{2}$ pour l'écart relatif de vitesse propre du régulateur et $E_2 = \frac{E}{2}$, pour celui qui est dû au coup de lime, ce qui permet de calculer ce coup de lime.

Puis, on calculera $y$ par la formule du paragraphe précédent, ou :

$$y = 6\left[\frac{1+\sqrt{L}}{2}\right]\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}},$$

formule applicable au régulateur de Porter, le coefficient L ayant la même signification et s'établissant de la même façon que pour une valve équilibrée ; les valeurs $\lambda$, $\mu$ ont la même valeur que s'il s'agissait d'une machine Corliss. Quant à E, c'est l'écart relatif de vitesse total, et non pas l'écart relatif de vitesse propre du régulateur, ou $\frac{E}{2}$.

Pour les régulateurs de Watt et Farcot, la valeur de $y$ est multipliée, comme au § 19, par le facteur :

$$\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\,\frac{b}{a} + Q}}.$$

Comme on a vu que, dans la pratique, L est généralement égal à 4, il en résulte que le coup de lime permet d'employer un volant égal aux $\frac{3}{4}$ de celui qu'il faudrait avec une soupape équilibrée, ou à $\frac{3}{2}$ de celui qu'il faudrait avec une machine Corliss ; ou bien ce coup de lime permet, à égalité de volant, d'employer une valeur de E sensiblement plus faible.

Il faut à présent voir ce que deviennent les équations relatives aux perturbations du quatrième genre.

Prenons pour point de départ ces formules dans le cas des machines Corliss ; il est clair qu'il faut d'abord multiplier le deuxième membre de ces formules par $(1 + K)$, comme pour les régulateurs à valves équilibrées, et cela pour les mêmes motifs.



Cherchons maintenant quelle est l'influence du coefficient L dont il a été question à plusieurs reprises ; pour cela, nous allons procéder comme nous l'avons fait au § 51.

Nous allons admettre *a priori*, que le volant, dans le cas de la valve à stabilité variable, doit être la moyenne arithmétique entre le volant nécessaire avec la machine Corliss et le volant nécessaire avec la valve équilibrée ; en d'autres termes, nous admettons qu'il faut multiplier par le coefficient $\frac{1+L}{2}$ le deuxième membre des équations de la corrélation pour les perturbations du quatrième genre ; quelques mots vont me suffire pour montrer que les formules ainsi obtenues donnent un volant largement suffisant pour éviter les perturbations du quatrième genre (la formule rigoureuse, trop difficile à trouver, donnerait un volant un peu moindre). En effet, en multipliant le deuxième membre des formules par $\frac{1+L}{2}$, cela revient à dire que le volant doit être, en pratique, 2,5 fois plus fort qu'avec une machine Corliss, puisque $L = 4$ avec les valves des dimensions que j'ai indiquées. Comme avec les valves équilibrées, il est L fois plus fort, ou 4 fois plus fort qu'avec les machines Corliss, il en résulte que, avec les valves à coup de lime, le volant doit être $\frac{2,5}{4}$ fois plus faible qu'avec les valves équilibrées. Cela posé, je rappelle que l'écart relatif de vitesse E se compose d'une partie $\frac{E}{2}$ due au régulateur lui-même et d'une autre partie $\frac{E}{2}$ due au coup de lime ; appelons maintenant *stabilité du système régulateur* l'écart relatif de vitesse par centimètre de course du manchon ; il est clair que, dans le cas actuel, la stabilité du système régulateur, dans le voisinage de la fermeture de la valve, est au moins égale à

$\frac{4}{2,5}$ fois la stabilité moyenne pendant toute la course du manchon.

Donc, si l'on compare le régulateur à valve à stabilité variable avec le régulateur à valve équilibrée, on voit que la stabilité a été augmentée dans un rapport plus grand que le volant n'a été diminué ; si l'on applique la théorie du § 30 au cas de la valve à coup de lime et au cas de la valve équilibrée pour $\frac{1}{n}$ seulement de la course du manchon, il est facile de voir que les perturbations du quatrième genre ne seront pas plus à craindre dans le deuxième cas que dans le premier ; les conditions sont même améliorées dans la valve à coup de lime, ce qui montre qu'on pourrait multiplier par un coefficient un peu inférieur à $\frac{1+L}{2}$.

Je pourrais chercher une formule serrant de plus près la réalité, mais je préfère m'en tenir à ce coefficient, pour ne pas trop compliquer la question.

En définitive, les formules relatives aux perturbations du quatrième genre, avec les valves ou soupapes à stabilité variable établies suivant mes principes, sont les suivantes :

1° Machines à cylindre unique :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive par cheval} = 19 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}(1+K)\frac{1+L}{2};$$

2° Machines à deux cylindres à 90° :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive par cheval} = 9,5 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}(1+K)\frac{1+L}{2};$$

3° Machines compound :

$$\frac{1}{2}\text{ force vive par cheval} = 14 \times \frac{60}{N} \times \frac{1}{E}(1+K)\frac{1+L}{2}.$$



Il est à remarquer que ces formules donnent, en pratique, à peu près exactement le même volant que celles de mon mémoire de 1887.

Donc, avec une valve à stabilité variable établie d'après mes principes, les régulateurs de vitesse peuvent rivaliser avec les machines Corliss les plus parfaites au point de vue de la régularité, en employant un volant un peu plus fort.

J'ai vérifié ce fait dans la pratique en installant en 1887 un régulateur et une valve d'après ces principes sur une vieille machine de plusieurs centaines de chevaux qui s'est trouvée réglée d'une façon absolument parfaite.

Enfin, la formule (2) du § 43 devient ici naturellement :

$$\frac{dn}{n} = \mu E = \frac{F}{2\left(P\frac{b}{a} + Q\right)},$$

ou :

$$P\,\frac{b}{a} + Q = \frac{F}{2\mu E}$$

($\beta$ étant le même que pour les machines Corliss).

Les autres formules du § 43 subsistent ici entièrement.

Naturellement, on ne met pas de frein à huile ; le frottement de la valve en tient lieu.

Je vais, pour finir, donner deux applications numériques, pour montrer que le volant, tout en étant un peu plus fort qu'avec les machines Corliss, est encore modéré en appliquant mes formules.

Reprenons l'application numérique du § 36, qui correspond à E = 0,05, donnant une régularité exceptionnellement bonne.

On a vu que, dans ce cas, pour la machine Corliss, on trouve, pour les perturbations du deuxième genre, une $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval égale à 458 kilogrammètres,

Ici, il faut multiplier par $\frac{1+\sqrt{L}}{2}$ ou $\frac{1+\sqrt{4}}{2}$ ou $\frac{3}{2}$; on a donc :

$$458 \times \frac{3}{2} = 687 \text{ kilogrammètres.}$$

Pour les perturbations du quatrième genre, on a trouvé au § 36 :

326 kilogrammètres.

Ici, il faut multiplier par $\frac{1+L}{2} = \frac{1+4}{2} = \frac{5}{2}$. On a donc :

$$326 \times \frac{5}{2} = 815 \text{ kilogrammètres.}$$

Ici, les perturbations du quatrième genre l'emportent sur celles du deuxième genre; ce serait le contraire si la machine était à grande vitesse ou à deux cylindres, ce qui est le cas habituel des régulateurs à valve.

Dans cette application, je ne tiens pas compte du coefficient $(K + 1)$, car je suppose la valve placée à côté du cylindre.

Avec les régulateurs à ressort on trouverait des chiffres bien plus faibles encore, surtout avec les machines à grande vitesse ou à plusieurs cylindres.

§ 53. — **Marche des calculs avec régulateurs à boules et à ressorts.** — La marche des calculs est la même qu'au paragraphe précédent, si ce n'est que $y$ est donné, comme au § 46, par la formule :

$$y = 6\,\frac{1+\sqrt{L}}{2}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{P\frac{b}{a} + Q + R}}.$$

On voit donc que $y$ est d'autant plus petit que R est



plus grand; c'est ce qui montre le grand avantage des régulateurs à ressorts, comme je l'ai fait remarquer à plusieurs reprises.

Les régulateurs de Tangye et analogues peuvent aussi donner d'excellents résultats comme régulateurs à valve ou à soupape, à cause de leur faible inertie (§ 66). Mais il est essentiel de les bien calculer suivant mes indications et de s'assurer qu'ils ne donnent pas des frottements trop considérables.

Pour le régulateur dans le volant du § 9, la formule est :

$$y = 6\,\frac{1+\sqrt{L}}{2}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\frac{c'}{c}\right)^2}{2R\left(\frac{c'}{c}\right)^2}};$$

avec l'un de ces appareils et une valve à stabilité variable, on aurait donc une régularité merveilleuse, et cela avec un volant de poids modéré.

Ici, comme dans le paragraphe précédent, les formules relatives aux perturbations du quatrième genre sont les mêmes que pour les machines Corliss, avec les coefficients $(1+K)$ et $\frac{1+L}{2}$.

On voit donc que, dans ce cas, comme dans les autres il y a un grand intérêt à employer une valve très près du ou des cylindres et de petites dimensions.

## V. — § 54. — Remarques et dispositions pratiques des valves et leviers.

Voici, pour finir les régulateurs à valves, quelques remarques d'une certaine importance :

On peut vérifier expérimentalement la valeur de l'effort $\Phi_1$ qui produit la fermeture de la valve, une fois le

coup de lime donné ; il suffit pour cela de suspendre des poids au bout du levier de la valve jusqu'à ce qu'elle se ferme, malgré sa résistance à la fermeture due au coup de lime ; c'est une très bonne précaution, car, si l'axe de la valve est tant soit peu excentré sans qu'on le sache, la valeur de $\Phi_1$ est différente de celle qui a été calculée ; il suffit d'un demi-millimètre d'erreur sur la position de l'axe de la valve pour modifier $\Phi_1$ d'une façon appréciable.

On trouvera dans mon mémoire de 1887 tous les détails et dessins d'exécution sur les constructions des valves, des soupapes et des leviers de transmission ; on y trouvera aussi de nombreux détails pratiques sur l'essai des régulateurs existants, sur l'installation de bons régulateurs sur de vieilles machines, etc..., détails auxquels je prie les praticiens de vouloir bien se reporter (*).

---

# CINQUIÈME PARTIE.

## RÉGULATEURS AGISSANT INDIRECTEMENT SUR LA DISTRIBUTION.

### I. — § 55. — Ancien régulateur a embrayages.

J'ai donné dans mon mémoire de 1879 la théorie de la corrélation entre le volant et le régulateur de vitesse dans les machines à vapeur, lorsque le régulateur agit indirectement sur la distribution au moyen de l'embrayage classique à pignons (Voir ce mémoire, § 29). J'ai démontré que ce système devait être abandonné, parce

(*) On trouvera ce mémoire, ou dans les *Annales des Mines*, comme il est dit ci-dessus, ou sous forme de brochure isolée (Dunod, 1888), ou dans la *Revue Industrielle* de 1888 (cinq articles).



qu'il donne lieu à des oscillations très grandes et permanentes de la vitesse, et cela dans des limites assez étendues pour que le volant puisse parfois être exposé à faire explosion ; j'ai montré qu'il se produit un fait très curieux : soit une machine de 100 chevaux par exemple ; si le travail résistant, tout en restant très voisin de 100 chevaux, subit des variations de 1 cheval seulement, tantôt en plus, tantôt en moins, il se peut que l'effet perturbateur de ces variations s'ajoute, si elles tombent dans un mauvais moment, à un tel point que 50 variations de 1 cheval, survenant même avec un certain intervalle de temps entre elles, peuvent faire autant de mal qu'une seule variation de 50 chevaux et donner lieu à d'énormes oscillations de la vitesse. Ce système, depuis cette époque, a été abandonné partout où la régularité de la machine offre un certain intérêt.

### II. — § 56. — Nouveaux systèmes de régulateurs a action indirecte.

Cela ne veut pas dire qu'on ne trouvera pas de bons régulateurs à action indirecte avec un autre système d'embrayages. M. Marcel Deprez, membre de l'Institut, a déjà fait, en 1876, des remarques fort importantes sur la manière d'éviter les oscillations de ces appareils, en interrompant l'embrayage à un moment convenable.

---

# SIXIÈME PARTIE.

## RÉGULATEURS DE SYSTÈMES DIVERS.

### I. — § 57. — Régulateur Denis pour machines a vapeur.

Je ne donnerai pas ici la description du régulateur Denis employé dans les machines Weyher et Richmond ; c'est un excellent appareil, dont l'emploi s'impose lorsqu'on veut avoir une vitesse moyenne rigoureusement constante malgré de grandes variations du travail résistant, et cela avec un très petit volant (V. la description sommaire du régulateur Denis dans mon mémoire de 1878). Dans cet appareil la théorie de la corrélation est la même que pour les régulateurs ordinaires, sans tenir compte du dispositif spécial de M. Denis; on considère le régulateur en lui-même avec son grand écart relatif de vitesse qui permet d'employer un petit volant, comme je l'ai montré dans les formules des deuxième et quatrième parties du présent mémoire.

Le système Denis est suffisant pour régler une locomobile à très faible volant chargée de donner la force motrice à un éclairage électrique par incandescence ; il rend de très grands services.

### II. — § 58. — Régulateurs pour machines a vapeur non basés sur l'action de la force centrifuge.

Je citerai d'abord l'ancien régulateur Larivière (V. mon mémoire de 1878) ; en le modifiant comme je l'ai indiqué il peut donner de bons résultats.



Je citerai en second lieu le régulateur d'Allen (V. mon mémoire de 1878). Cet appareil, calculé comme je l'ai indiqué, peut donner de très bons résultats ; il peut être sujet à des perturbations du deuxième genre dues à l'inertie du système ; on peut étudier ces perturbations par une méthode similaire à ma théorie de ces perturbations dans les machines Corliss ; mais je ne donnerai pas ces formules ici, pour ne pas m'étendre trop sur un système qui est peu répandu dans la pratique. Ce système a l'avantage de donner une grande puissance ; on a peut-être le tort de ne pas l'employer plus souvent. Il a l'inconvénient de donner des changements de la vitesse de régime quand l'huile change de consistance.

Cet appareil est à recommander quand on veut un régulateur de peu de précision et d'une grande puissance.

# SEPTIÈME PARTIE.

## FORMULES GÉNÉRALES ET APPLICATIONS.

### I. — Formules générales du régulateur d'un système quelconque des organes de réglage et du volant, le régulateur étant a force centrifuge et a action directe.

**§ 59. — Courbe de la vitesse en fonction de la position du manchon du régulateur.** — J'ai donné la théorie complète de la corrélation pour les régulateurs de Watt, de Porter, de Farcot, de Watt à points de suspension séparés, et pour divers régulateurs à ressorts.

Je vais montrer que la même théorie peut être facilement généralisée au cas des régulateurs de Buss, de

Proëll et à tous les régulateurs quelconques à force centrifuge, à axe vertical et à action directe ; en un mot, je vais donner la théorie de la corrélation dans le cas le plus général.

Tout d'abord, je vais chercher quelle est la formule qui donne la vitesse angulaire $\omega$ des régulateurs en fonction de la position des pièces du régulateur.

Soit Q (Pl. X, *fig.* 8) le manchon du régulateur.

Soit P le poids d'une des boules du régulateur ; soit $r$ sa distance à l'axe correspondant à la position Q du manchon ; soit $s$ le déplacement élémentaire de la boule correspondant à un déplacement infiniment petit $q$ du manchon ; soient $dy$ et $dx$ les composantes verticale et horizontale de $s$. Je suppose que le régulateur contienne un certain nombre de contrepoids $\Sigma P$ représentés avec les mêmes notations.

Cela posé, appliquons au système l'équation connue :

$$\Sigma X dx + \Sigma y dy = 0, \tag{1}$$

pour tous les déplacements compatibles avec les liaisons.

Je prends pour axe des X une horizontale passant par un point quelconque O situé au-dessus du système, et pour axe des Y l'axe du régulateur.

En P, on a :

$$\begin{cases} X = \text{force centrifuge} = \dfrac{P}{g}\omega^2 r, \\ Y = \text{poids de la boule} = -P. \end{cases}$$

En Q, on a :

$$\begin{cases} X = 0, \\ Y = -Q. \end{cases}$$

Posons, en P :

$$\begin{cases} dx = m, \\ dy = n. \end{cases}$$



Puis, posons en Q :

$$\begin{cases} dx = 0, \\ dy = q. \end{cases}$$

Substituons dans l'équation (1) ; il vient :

$$\frac{P}{g}\omega^2 rm - Pn - Qq = 0.$$

Supposons que le régulateur comprenne un certain nombre de boules comme P, mais avec des valeurs différentes de P, $r$, $c'$, $c_1$, $c_2$ ; l'équation précédente devient :

$$\Sigma\left(\frac{P}{g}\omega^2 rm\right) - \Sigma Pn - \Sigma Qq = 0, \tag{2}$$

ou bien :

$$\frac{\omega^2}{g}\Sigma Prm - \Sigma Pn - \Sigma Qq = 0,$$

d'où l'on tire :

$$\frac{\omega^2}{g}\Sigma\left[Pr\frac{m}{q}\right] = \Sigma\left(P\frac{n}{q}\right) + Q. \tag{3}$$

Cette équation peut s'écrire :

$$\omega^2 = g\,\frac{\Sigma\left(P\dfrac{n}{q}\right) + Q}{\Sigma\left[Pr\dfrac{m}{q}\right]} \tag{3 bis}$$

et avec un ressort R agissant dans le sens de Q :

$$\omega^2 = g\,\frac{\Sigma\left(P\dfrac{n}{q}\right) Q + R}{\Sigma\left[Pr\dfrac{m}{q}\right]};$$

la vitesse en nombre de tours est donnée par la relation :

$$n = \omega \times \frac{60}{2\pi}.$$

§ 60. — **Puissance du régulateur.** — On tire de l'équation précédente :

$$Q = \frac{\omega^2}{g} \Sigma \left( Pr \frac{m}{q} \right) - \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right).$$

Prenons la différentielle de Q par rapport à $\omega$ ; on a $dQ = \frac{2}{g} \omega d\omega \Sigma \left( Pr \frac{m}{q} \right)$. Multiplions et divisons par $\omega$, il vient :

$$dQ = \frac{2}{g} \omega^2 \frac{d\omega}{\omega} \Sigma \left( Pr \frac{m}{q} \right). \tag{4}$$

Dans le deuxième membre, je puis remplacer la valeur :

$$\frac{\omega^2}{g} \Sigma \left( Pr \frac{m}{q} \right),$$

par sa valeur :

$$\Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) + Q,$$

comme l'indique l'équation (3) ci-dessus ; alors l'équation (4) devient :

$$dQ = 2 \left[ \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) + Q \right] \frac{d\omega}{\omega}.$$

Donc :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{dQ}{2 \left[ Q + \Sigma P \frac{n}{q} \right]}.$$

Donc cette formule donne la perturbation relative de vitesse $\frac{d\omega}{\omega}$ due à un effort $dQ = F$ évalué au manchon du régulateur ; l'équation s'écrit donc :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2 \left[ Q + \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) \right]}. \tag{5}$$

Avec un ressort R agissant dans le même sens que Q,



on aurait :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2 \left[ Q + R + \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) \right]}.$$

§ 61. — **Théorie des perturbations du deuxième genre.** — A présent, je vais me baser sur la relation précédente pour donner la théorie générale de la corrélation.

On a toujours, comme au § 17 :

$$y = x \times \frac{75}{2E}. \tag{6}$$

L'équation qui exprime que la demi-force vive axiale du régulateur est arrêtée sur une longueur $\lambda c$ par le frein F devient ici (comme dans les régulateurs de Watt) :

$$\frac{1}{2} \frac{Q}{g} \left( \frac{c}{x} \right)^2 + \Sigma \left[ \frac{P}{2g} \left( \frac{c'}{x} \right)^2 \right] = F \lambda c. \tag{7}$$

On se rappelle que $c$ est la course totale du manchon, $c'$ la course de la boule P correspondante, et $x$ la vitesse maxima du manchon définie au § 18.

Enfin, d'après l'équation (5) ci-dessus, on a :

$$\mu E = \frac{F}{2 \left[ Q + \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) \right]}. \tag{8}$$

On tire donc de (8) la relation :

$$F = 2 \mu E \left[ Q + \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) \right].$$

Substituons dans (7) ; il vient :

$$\frac{1}{2} \frac{Q}{g} \left( \frac{c}{x} \right)^2 + \Sigma \left[ \frac{P}{2g} \left( \frac{c'}{x} \right)^2 \right] = 2 \lambda \mu c E \left[ Q + \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) \right].$$

Cette équation peut s'écrire :

$$\frac{1}{2g} \left( \frac{c}{x} \right)^2 \left\{ Q + \Sigma \left[ P \left( \frac{c'}{c} \right)^2 \right] \right\} = 2 \lambda \mu c E \left[ Q + \Sigma P \left( \frac{n}{q} \right) \right].$$

Divisons par $c$ les deux membres, et chassons le dénominateur ; il vient :

$$c\left\{Q+\Sigma\left[P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right]\right\}=4g\lambda\mu x^2E\left[Q+\Sigma\left(P\frac{n}{q}\right)\right].$$

On tire $x$ de cette équation ; il vient :

$$x=\sqrt{\frac{c\left\{Q+\Sigma\left[P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right]\right\}}{4g\lambda\mu E\left[Q+\Sigma\left(P\frac{n}{q}\right)\right]}}.$$

Reprenons l'équation (6), ou $y=x\times\frac{75}{2E}$.

Remplaçons dans cette équation $x$ par sa valeur ci-dessus, il vient :

$$y=\frac{75}{4\sqrt{g}}\times\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q+\Sigma\left[P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right]}{Q+\Sigma\left[P\frac{n}{q}\right]}}.$$

Telle est la formule très simple qui donne la $\frac{1}{2}$ force vive que doit avoir le volant par cheval, dans le cas d'un régulateur quelconque à axe vertical.

En prenant comme unité le mètre, le kilogramme et la seconde, elle devient :

$$(9)\qquad y=6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q+\Sigma\left[P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right]}{Q+\Sigma\left[P\left(\frac{n}{q}\right)\right]}}.$$

Si le manchon, en outre de son poids Q, était muni d'un ressort, on aurait la formule suivante, en désignant par R la compression ou tension moyenne du ressort :

$$(10)\qquad y=6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q+\Sigma\left[P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right]}{Q+R+\Sigma\left[P\left(\frac{n}{q}\right)\right]}}.$$



Nous avons donc établi la formule de la corrélation pour les perturbations du deuxième genre, ou les plus importantes, et pour les machines Corliss. La même formule s'applique aux régulateurs à valve équilibrée, en multipliant le deuxième membre par $\sqrt{L}$ ; la même formule s'applique à la valve à stabilité variable en multipliant le deuxième membre par :

$$\frac{1+\sqrt{L}}{2}$$

(L a la même signification que dans la quatrième partie du mémoire).

§ 62. — **Perturbations du premier et du quatrième genres.** — Pour les perturbations du premier et du quatrième genres nous n'avons rien à ajouter à ce qui a été dit dans le mémoire, car elles ne dépendent pas du système de régulateur employé ; les formules que j'ai données dans le mémoire sont donc absolument générales.

§ 63. — **Théorie des perturbations du troisième genre.** — La puissance du frein est donnée, comme au § 25, par la formule :

$$(11)\qquad F=\frac{(f'+f'')e}{\lambda c};$$

d'autre part, en appliquant la formule de la puissance du régulateur, on a :

$$\mu E=\frac{F}{2\left[Q+\Sigma\left(P\frac{n}{q}\right)\right]}.$$

Supposons d'abord que Q ne soit pas nul; posons $\frac{P}{Q}=A$; on a alors :

$$\mu E=\frac{F}{2Q\left[1+\Sigma\left(A\frac{n}{q}\right)\right]},$$

d'où :

$$(12)\qquad Q=\frac{F}{2\mu E\left[1+\Sigma\left(A\frac{n}{q}\right)\right]}=\frac{(f'+f'')\,e}{2\lambda\mu Ec\left[1+\Sigma\left(A\frac{n}{q}\right)\right]}.$$

Cette équation donne la valeur de Q, chacune des valeurs de A et analogues se choisissant arbitrairement; on connait donc la puissance du frein par la formule (11) et celle du régulateur par la formule (12). Si Q était nul, on calculerait la puissance du régulateur en calculant le poids P de l'une des boules, et l'on se donnerait arbitrairement le rapport de chacune des autres boules à celle-là.

Avec un ressort on aurait:

$$\mu E=\frac{F}{2\left[Q+R+\Sigma\left(P\frac{n}{q}\right)\right]}=\frac{(f'+f'')\,e}{2\lambda c\left[Q+R+\Sigma\left(P\frac{n}{q}\right)\right]},$$

d'où :

$$Q+R+\Sigma\left(\frac{Pn}{q}\right)=\frac{(f'+f'')\,e}{2\lambda\mu Ec}.$$

Telle est la formule générale qui donne la puissance du régulateur à adapter à une machine Corliss, pour un régulateur à poids, à surcharge et à ressort.

Dans toutes ces formules, je néglige toujours la force centrifuge des bielles, à côté de celles des boules ; cette hypothèse est admissible dans la grande majorité des cas; le seul inconvénient, c'est que, dans la pratique, la vitesse de rotation du régulateur diffère très légèrement de celle qui a été calculée ; mais on en est quitte pour modifier un peu la vitesse du régulateur en réglant à la main la surcharge du manchon ; c'est une facilité qu'on doit toujours se réserver.

## II. — Applications.

§ 64. — **Application au régulateur d'Andrade.** — Nous allons voir que les formules générales qui précèdent permettent de faire en quelques instants tous les calculs relatifs à l'établissement du régulateur, des organes de réglage et du volant, pour un régulateur quelconque. Commençons par le régulateur d'Andrade, représenté par le croquis théorique (Pl. X, *fig.* 10).



Reprenons la formule générale 3 *bis* du § 59, où :

$$\omega^2=\frac{g\Sigma\left(P\frac{n}{q}\right)+Q}{\Sigma\left[Pr\frac{m}{q}\right]}.$$

Cette formule donne, on l'a vu, la vitesse angulaire du régulateur en fonction de la position des bielles et du manchon.

Considérons, comme habituellement un axe des $x$ horizontal passant par le sommet A et un axe des $y$ vertical.

Nous avons vu (§ 59) que :

$m=dx$, $n=dy$ (en ce qui concerne le point B) ;
$q=dy$, (en ce qui concerne le point M).

Or, l'abscisse $x$ du point B $=b\sin\alpha$.
L'ordonnée $-y$ du point B $=-b\cos\alpha$.
On en conclut : $dx=m=b\cos\alpha d\alpha$.
On en conclut : $dy=n=b\sin\alpha d\alpha$.
L'ordonnée $-y$ du point M :

$$=-[a+2a\cos 2\alpha];$$

donc :

$$dy=q=4a\sin 2\alpha d\alpha=8a\sin\alpha\cos\alpha d\alpha.$$

Enfin, $r=b\sin\alpha$.
Remplaçons $m$, $n$, $q$, $r$, par leurs valeurs dans la for-

mule qui donne $\omega^2$; on a :

$$\omega^2 = g \times \frac{2P \dfrac{b \sin \alpha d\alpha}{8a \sin \alpha \cos \alpha d\alpha} + Q}{2P \times b \sin \alpha \times \dfrac{b \cos \alpha d\alpha}{8a \sin \alpha \cos \alpha d\alpha}};$$

$$\omega^2 = g \frac{Pb + 4aQ \cos \alpha}{Pb^2 \cos \alpha} = g \frac{b + 4a \dfrac{Q}{P} \cos \alpha}{b^2 \cos \alpha};$$

$$\omega^2 = g \left[ \frac{1}{b \cos \alpha} + \frac{4a}{b^2} \times \frac{Q}{P} \right].$$

Cette formule permet de construire la courbe donnant la vitesse angulaire et la vitesse en nombre de tours par minute, en fonction de l'angle $\alpha$; pour chaque valeur de $\alpha$, la position du manchon est donnée par la relation :

$$AM = a + 2a \cos 2\alpha.$$

On connait donc la vitesse angulaire en fonction de la position du manchon, avec l'aide de ces formules.

Évaluons maintenant la puissance du régulateur au moyen de la formule du § 60, où :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2 \left[ Q + \Sigma \left( P \frac{n}{q} \right) \right]}.$$

On a :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2 \left[ Q + 2P \dfrac{b \sin \alpha d\alpha}{8a \sin \alpha \cos \alpha d\alpha} \right]};$$

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2 \left[ Q + P \dfrac{b}{4a \cos \alpha} \right]}.$$

Il est facile de voir que cette équation est la même que celle du § 12 de mon mémoire de 1878, auquel nous renvoyons le lecteur pour plus de détails sur les propriétés du régulateur d'Andrade.

Calculons à présent le volant par la formule des perturbations du deuxième genre (§ 61); on a :



$$y = 6 \sqrt{\frac{c}{\lambda \mu E^3}} \sqrt{\frac{Q + \Sigma \left[ P \left( \frac{c'}{c} \right)^2 \right]}{Q + \Sigma \left[ P \frac{n}{q} \right]}}.$$

Or :

$$\frac{n}{q} = \frac{b \sin \alpha d\alpha}{8a \sin \alpha \cos \alpha d\alpha} = \frac{b}{8a \cos \alpha},$$

donc :

$$y = 6 \sqrt{\frac{c}{\lambda \mu E^3}} \sqrt{\frac{Q + 2P \left( \frac{c'}{c} \right)^2}{Q + \frac{Pb}{4a \cos \alpha}}}.$$

Si nous posons $\frac{P}{Q} = A$, on a :

$$y = 6 \sqrt{\frac{c}{\lambda \mu E^3}} \sqrt{\frac{1 + 2A \left( \frac{c'}{c} \right)^2}{1 + \frac{Ab}{4a \cos \alpha}}}$$

(A se fixe arbitrairement).

Tout est connu dans cette formule, car la course $c$ résulte de la relation établie ci-dessus entre la vitesse et la position du manchon ; $c'$ résulte du tracé graphique du régulateur. Si le régulateur est à valve ou à soupape, $y$ doit être multiplié par le coefficient convenable, comme on l'a vu au § 61.

Pour les perturbations du troisième genre, la formule (12) du § 63 donne :

$$Q = \frac{(f' + f'')\, c}{2\lambda \mu E c \left( 1 + \dfrac{Ab}{4a \cos \alpha} \right)}$$

($\alpha$ est ici l'angle moyen correspondant à la position moyenne du manchon).

Enfin, pour les perturbations du premier et du quatrième

genres et pour la marche des calculs, on n'a qu'à procéder comme dans la deuxième partie.

§ 65. — **Application au régulateur de Proëll, etc.** — Voici à présent l'application des formules générales au régulateur bien connu de Proëll (Pl. X, *fig.* 11).

Reprenons la formule (§ 59) :

$$\omega^2 = g\,\frac{\Sigma\left(\mathrm{P}\,\frac{n}{q}\right) + \mathrm{Q}}{\Sigma\left[\mathrm{P}r\,\frac{m}{q}\right]}.$$

On a ici :

Abscisse de C :

$$= x = d + a\sin\alpha + b\sin(\alpha - \beta),$$
$$dx = m = a\cos\alpha d\alpha + b\cos(\alpha - \beta)d\alpha;$$

Ordonnée de C :

$$= -y = -[a\cos\alpha - b\cos(\alpha - \beta)],$$
$$dy = n = +a\sin\alpha d\alpha - b\sin(\alpha - \beta)\,d\alpha;$$

Ordonnée de M :

$$= -2a\cos\alpha,$$
$$dy = q = 2a\sin\alpha d\alpha.$$

Substituons dans l'équation ci-dessus ; il vient :

$$\omega^2 = g\,\frac{2\mathrm{P}\,\dfrac{a\sin\alpha d\alpha - b\sin(\alpha-\beta)\,d\alpha}{2a\sin\alpha d\alpha} + \mathrm{Q}}{2\mathrm{P}r\,\dfrac{a\cos\alpha d\alpha + b\cos(\alpha-\beta)\,d\alpha}{2a\sin\alpha d\alpha}}.$$

Or, on a :

$$r = d + a\sin\alpha + b\sin(\alpha - \beta).$$

Donc :

$$\omega^2 = g\,\frac{a\sin\alpha - b\sin(\alpha-\beta) + \dfrac{\mathrm{Q}}{\mathrm{P}}\,a\sin\alpha}{[d + a\sin\alpha + b\sin(\alpha-\beta)]\,[a\cos\alpha + b\cos(\alpha-\beta)]}.$$

Telle est la formule qui donne la vitesse angulaire du



régulateur en fonction de l'angle variable $\alpha$ (l'angle $\beta$ est fixe et peut se choisir à volonté).

Évaluons maintenant la puissance du régulateur.

On a :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{\mathrm{F}}{2\left[\mathrm{Q} + \Sigma\left(\mathrm{P}\,\frac{n}{q}\right)\right]}.$$

Or :

$$\frac{n}{q} = \frac{a\sin\alpha d\alpha - b\sin(\alpha-\beta)\,d\alpha}{2a\sin\alpha d\alpha};$$

il vient donc :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{\mathrm{F}}{2\left[\mathrm{Q} + 2\mathrm{P}\,\dfrac{a\sin\alpha - b\sin(\alpha-\beta)}{2a\sin\alpha}\right]},$$

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{\mathrm{F}}{2\left[\mathrm{Q} + \mathrm{P}\left(1 - \dfrac{b\sin(\alpha-\beta)}{a\sin\alpha}\right)\right]}.$$

Calculons à présent le volant par la formule des perturbations du deuxième genre (§ 61), où :

$$y = \sqrt{\frac{c}{\lambda\mu\mathrm{E}^3}}\sqrt{\frac{\mathrm{Q} + \Sigma\left[\mathrm{P}\left(\dfrac{c'}{c}\right)^2\right]}{\mathrm{Q} + \Sigma\left[\mathrm{P}\,\dfrac{n}{q}\right]}}.$$

Le dénominateur du deuxième radical est le même que celui de la formule précédente ; on a donc :

$$y = \sqrt{\frac{c}{\lambda\mu\mathrm{E}^3}}\sqrt{\frac{\mathrm{Q} + 2\mathrm{P}\left(\dfrac{c'}{c}\right)^2}{\mathrm{Q} + \mathrm{P}\left(1 - \dfrac{b\sin(\alpha-\beta)}{a\sin\alpha}\right)}}.$$

Si l'on pose $\mathrm{A} = \dfrac{\mathrm{P}}{\mathrm{Q}}$, on a :

$$y = \sqrt{\frac{c}{\lambda\mu\mathrm{E}^3}}\sqrt{\frac{1 + 2\mathrm{A}\left(\dfrac{c'}{c}\right)^2}{1 + \mathrm{A}\left(1 - \dfrac{b\sin(\alpha-\beta)}{a\sin\alpha}\right)}},$$

le rapport A pouvant se fixer arbitrairement ($\alpha$ est ici l'angle moyen et correspond au milieu de la course du manchon).

Cette formule permet de calculer le volant, puisque tout y est connu ; elle est, sans doute, plus compliquée que celle du régulateur de Watt ou de Farcot, mais cependant une application numérique peut être faite très rapidement.

Comme pour le régulateur d'Andrade, on calculera la masse du régulateur pour les perturbations du troisième genre d'après la formule (13) du § 63, qui devient ici :

$$Q = \frac{(f + f')\ e}{2\lambda\mu E c \left[1 + A\left(1 - \frac{b \sin(\alpha - \beta)}{a \sin \alpha}\right)\right]}.$$

Pour les perturbations du premier et du quatrième genres et la marche des calculs, on procédera comme dans la deuxième partie.

Il serait facile d'appliquer ces calculs à bien d'autres régulateurs, comme celui de Buss, le régulateur Cosinus, etc. Je m'arrêterai là cependant, puisqu'il suffira de procéder de la même façon.

Remarquons que nous aurions pu établir toutes les formules précédentes des régulateurs Andrade et Proëll sans passer par les formules générales, en procédant comme dans la première et la deuxième parties de ce mémoire.

Si le régulateur est à valve ou à soupape, la valeur de $y$ ci-dessus doit être multipliée par le coefficient convenable, comme on l'a vu au § 61 et dans la quatrième partie.

§ 66. — **Application aux régulateurs Tangye et analogues.** — Nous allons finir par une application à un genre de régulateurs à ressort, très usité en Angleterre et qui commence à se généraliser partout, surtout pour les régulateurs à soupape ; je veux parler du régulateur de Tangye et analogues.



La *fig.* 9 (Pl. X) représente un croquis théorique qui donne le principe de ces appareils.

Les deux boules P et P′ sont fixées au bout de deux courts leviers qui oscillent autour de deux points fixes B et B′ ; imaginons que ces deux leviers soient fixés à deux roues dentées pouvant entraîner dans leur mouvement l'axe du régulateur, qui est lui-même muni de dents en conséquence ; puis l'axe est soumis à l'effort de traction d'un ressort à spirale attaché par le haut à un point fixe A ; les trois points A, B, B′, sont donc trois points fixes situés dans le même plan vertical que les boules et tournant avec elles autour de l'axe vertical du régulateur. Puis, par dessous, la tige du régulateur agit directement par traction sur une soupape équilibrée située au dessous et non représentée sur la figure.

Dans certains appareils, les roues dentées sont remplacées par des touches ; dans d'autres, par de petits leviers ; mais les mouvements relatifs sont à peu de chose près conformes à mon croquis théorique.

Soient : $a$ = BC la longueur d'une bielle ; $b$, le rayon de la roue dentée ayant son centre en B, et $2d$, la distance BB′ ; soit $z$ l'angle de BC avec la verticale.

Appliquons la théorie générale à ce genre de régulateurs.

Cherchons d'abord la courbe de la vitesse en fonction de l'écartement des leviers.

La formule générale est :

$$\omega^2 = g\,\frac{\Sigma\left(P\,\frac{n}{q}\right) + Q + R}{\Sigma\left[Pr\,\frac{m}{q}\right]}$$

On a ici en P :

$$\begin{cases} x = r = d + a \sin\alpha, \\ dx = m = a \cos\alpha d\alpha, \\ y = -a\cos\alpha, \\ dy = n = a \sin\alpha d\alpha; \end{cases}$$

En Q :

$$\begin{cases} x = 0, \qquad y = \text{C}^{\text{te}} - b\alpha, \\ dy = q = -bd\alpha. \end{cases}$$

Q représente le poids de la tige et de la soupape équilibrées.

Quant à R, ou tension du ressort, il est négatif, puisqu'il agit en sens contraire de Q; il peut se mettre sous la forme $A + B\alpha$, dans laquelle A est la tension du ressort pour $\alpha = 0$ et $B\alpha$, la tension proportionnelle à l'angle $\alpha$.

($\alpha$ est un angle exprimé en longueur d'arc sur une circonférence de rayon égal à l'unité.)

Substituons dans les formules ; il vient :

$$\omega^2 = g \frac{2P \dfrac{a \sin\alpha d\alpha}{-bd\alpha} + Q - (A + B\alpha)}{2P\,(d + a\sin\alpha)\dfrac{a\cos\alpha d\alpha}{-bd\alpha}},$$

$$\omega^2 = g \frac{2P \dfrac{a}{b}\sin\alpha - Q + A + B\alpha}{2P(d + a\sin\alpha)\dfrac{a}{b}\cos\alpha}.$$

On a, de plus, comme toujours, $n = \omega \times \dfrac{60}{2\pi}$.

Calculons à présent la puissance du régulateur; la formule générale est :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{-F}{2\left[Q + R + \Sigma\left(P\dfrac{n}{q}\right)\right]}.$$



(Il faut ici mettre à F le signe —, car il est en sens contraire de Q.)

Elle donne ici :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{-F}{2\left[Q - (A + B\alpha) + 2P\left(\dfrac{a\sin\alpha d\alpha}{-bd\alpha}\right)\right]},$$

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2\left[A + B\alpha - Q + 2P\dfrac{a}{b}\sin\alpha\right]}.$$

Voici maintenant la formule qui donne le volant, d'après les perturbations du deuxième genre ; reprenons la formule générale :

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + \Sigma\left[P\left(\dfrac{c'}{c}\right)^2\right]}{Q + R + \Sigma\left[P\dfrac{n}{q}\right]}}$$

$\left(\text{ici, } \dfrac{c'}{c} \text{ est égal à } \dfrac{a}{b}\right)$.

Si l'on se reporte à la théorie générale (§ 61), il est facile de voir quand ce cas Q doit être pris avec le signe + au numérateur et avec le signe — au dénominateur ; quant à R, il doit avoir le signe + ; on a donc :

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + 2P\left(\dfrac{a}{b}\right)^2}{A + B\alpha - Q + 2P\dfrac{a}{b}\sin\alpha}},$$

telle est la formule générale qui donne le volant ($\alpha$ est ici l'angle moyen, pour le milieu de la course du manchon).

Naturellement, il faut multiplier par les coefficients convenables la valeur de $y$, si le régulateur est à valve ou soupape, comme on l'a vu au § 61.

Pour les perturbations du troisième genre et le calcul de la puissance du régulateur employé avec une machine

Corliss, on a la formule générale :

$$Q + R + \Sigma\left(P\frac{n}{q}\right) = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu Ec};$$

qui devient ici, en tenant compte des signes :

$$Q - R + 2P\frac{a\sin\alpha d\alpha}{-bd\alpha} = \frac{-(f' + f'')e}{2\lambda\mu Ec},$$

et remplaçant R par $A + B\alpha$ :

$$A + B\alpha - Q + 2P\frac{a}{b}\sin\alpha = \frac{(f' + f'')e}{2\lambda\mu Ec}$$

($\alpha$, angle correspondant au milieu de la course du manchon).

Telle est la formule donnant la puissance du régulateur; on voit qu'il reste possible de fixer arbitrairement plusieurs des éléments.

La plupart des régulateurs de ce genre donnent lieu à des frottements assez notables, mais on les perfectionnera sans doute à ce point de vue; ils ont certainement de l'avenir, non seulement comme régulateurs à soupape, mais aussi pour régler des machines Corliss, comme je l'ai montré.

§ 67. — **Applications diverses au moyen d'un calcul rapide.** — Il existe encore quelques régulateurs d'une forme entièrement compacte et telle que le poids des leviers ne soit pas très petit en fonction des boules. Dans ce cas, les calculs, tout en étant assez approchés, ne sont plus absolument exacts.

Il est facile de leur appliquer les formules générales, lorsqu'on a sous la main un de ces régulateurs pour lequel on peut faire une petite expérience (dans tout ce qui précède on a vu que les calculs sont basés sur la théorie pure).



L'expérience consiste à trouver expérimentalement la loi des valeurs de la vitesse de rotation, en fonction des déplacements du manchon; il est facile de s'en rendre compte en faisant tourner le régulateur *absolument libre* et en notant les positions du manchon pour chaque valeur de la vitesse en nombre de tours par minute. Cela posé, voici comment on peut calculer la puissance du régulateur et le volant au moyen des formules générales :

Considérons (*fig.* 12, Pl. X) une des boules P et le manchon Q du régulateur. Soient : $c$, la course totale utilisée du manchon du régulateur ; $c'$, l'arc de courbe décrit par la boule pendant cette course totale, le régulateur étant supposé au repos; soient : $BC_2 = c_2$, la projection horizontale de cet arc; et $BC_1 = c_1$, sa projection verticale. On peut remplacer le rapport $\frac{m}{q}$ des formules générales par le rapport $\frac{c_2}{c}$, et le rapport $\frac{n}{q}$ par $\frac{c_1}{c}$.

De cette façon, la formule de la puissance du régulateur devient :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{F}{2\left[Q + R + \Sigma\left(\frac{c_1}{c}\right)\right]}.$$

La formule donnant la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval (perturbations du deuxième genre) devient :

$$y = 6\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}}\sqrt{\frac{Q + \Sigma\left[P\left(\frac{c'}{c}\right)^2\right]}{Q + R + \Sigma\left[P\left(\frac{c_1}{c}\right)\right]}}.$$

les valeurs de $c$, $c'$, $c_1$, sont connues d'après l'expérience précitée et d'après le tracé graphique du régulateur. Les autres calculs se conduisent comme ci-dessus. En résumé, on voit que ma théorie générale s'applique aisément à

tous les genres de régulateurs de vitesse à force centrifuge à action directe et à axe vertical; d'autre part, j'ai étudié les régulateurs à axe horizontal et à ressorts, de sorte que mes formules ont un caractère absolument général.

### III. — Choix du régulateur suivant les cas.

§ 68. — **Cas des machines à vitesse modérée et à cylindre unique.** — Nous avons vu, § 35, quel est l'écart relatif de vitesse qu'il faut adopter, pour le régulateur, suivant les cas. Mais il me reste à exposer les considérations qui doivent guider pour choisir le régulateur. Je répéterai ici ce que je disais dès 1878: c'est que dans tous les cas on peut employer un régulateur quelconque et avoir quand même une excellente régularisation ; mais cependant il peut y avoir quelques avantages secondaires à choisir un régulateur déterminé dans chaque cas, et c'est ce que je me propose d'examiner à présent.

Supposons qu'il s'agisse d'une machine à vitesse modérée et à cylindre unique. Dans ce cas, on adoptera de préférence le système de régulateur agissant directement sur la distribution au moyen d'un déclic, pour ne pas être obligé d'adopter un volant trop fort et pour les autres motifs connus. L'exemple numérique du § 36 nous a donné les résultats suivants, pour la valeur de la $\frac{1}{2}$ force vive du volant par cheval, quand on veut avoir une très grande régularité :

338 kilogrammètres, eu égard aux perturbations du premier genre ;
448 kilogrammètres, eu égard aux perturbations du deuxième genre ;
326 kilogrammètres, eu égard aux perturbations du quatrième genre,



Comme on l'a vu, c'est le plus fort de ces trois chiffres qu'on est obligé d'adopter pour le volant. En employant les régulateurs à ressorts, on peut diminuer autant qu'on le veut le chiffre 448 ; dans ce cas, les perturbations du deuxième genre disparaissent à côté des deux autres; l'emploi des régulateurs à ressorts permet de gagner, dans ce cas, environ un quart sur le poids du volant. Il est incontestable, cependant, que les régulateurs à ressorts sont d'une construction et d'un montage beaucoup plus difficiles que les régulateurs à poids, surtout pour les régulateurs d'une grande précision, où il faut avant tout éviter les frottements. Il en résulte que, dans ce cas, il sera plus avantageux de renoncer à l'économie d'un quart sur le volant pour employer un régulateur sans ressort.

Cela posé, quel régulateur va-t-on choisir ? Les formules et les exemples numériques que j'ai donnés montrent tout d'abord que le régulateur de Watt sans surcharge du manchon doit être écarté ; de plus, les grandes machines exigent des régulateurs puissants à lourde surcharge de manchon ; cela conduit à adopter d'assez grandes dimensions pour le régulateur ; les dimensions étant grandes, il ne faut pas avoir recours à un régulateur se rapprochant de l'isochronisme, comme les régulateurs de Farcot, ou d'Andrade, etc., car ils obligeraient à l'emploi d'une course du manchon trop grande ; il en résulterait que la courbe des variations de la vitesse du régulateur en fonction des déplacements du manchon s'éloignerait trop d'une ligne droite. On aura donc recours, pour les machines de dimensions moyennes, au régulateur de Porter à point de suspension unique et, pour les très grandes machines, au régulateur de Porter à points de suspension séparés.

On voit donc que les conclusions de cette étude sont absolument conformes aux usages que la pratique a enseignés aux constructeurs.

Si la machine est de faible puissance, alors on emploie

un régulateur de Farcot, ou tout autre du même genre, pour éviter de trop grandes dimensions du régulateur.

Je le répète, il est absolument inutile, dans ce cas, de s'ingénier à découvrir de nouvelles formes de régulateurs ou de s'obliger à payer des droits de brevet, puisque les régulateurs ordinaires sont complètement satisfaisants.

Si l'on désirait avoir une régularité tout à fait exceptionnelle, sans employer un gros volant, on aurait grand avantage à employer un régulateur à ressort.

§ 69. — **Cas de machines à vitesse modérée ou d'un ou plusieurs cylindres ordinaires ou compound.** — Quand la machine est très puissante, il est tout indiqué d'employer un volant relativement modéré; pour cela, le mieux est d'employer deux cylindres ordinaires ou compound pour diminuer les perturbations des premier et quatrième genres.

Dans ce cas, on emploie généralement un régulateur agissant sur la distribution, bien qu'on puisse cependant employer un régulateur à valve; la machine étant à deux cylindres, les chiffres ci-dessus de 338 et de 326 kilogrammètres, relatifs aux perturbations du premier et du quatrième genres, seraient de beaucoup diminués; on peut s'en assurer en faisant des applications numériques. Au contraire, rien n'est changé au chiffre de 448 kilogrammètres relatif aux perturbations du deuxième genre. On voit donc que, dans ce cas, on peut gagner la moitié sur le poids du volant et même souvent plus, en supprimant l'influence des perturbations du deuxième genre. Dans ce cas, l'emploi du régulateur à ressort de la Pl. VII, *fig.* 9, peut offrir de grands avantages. Je l'ai proposé dans mon mémoire de 1887, comme on l'a vu. Il est possible qu'on imagine d'autres dispositions, jouissant des mêmes avantages, comme l'emploi d'un ressort avec les régulateurs de Proëll, etc. Mais celui que j'indique peut suffire à tous les besoins.



On peut me faire observer qu'il existe de nombreuses machines à deux cylindres, qui sont bien réglées avec des régulateurs à poids sans ressort; c'est vrai, à condition que le volant soit assez fort; s'il ne l'est pas, ce qui arrive souvent, ces machines sont sujettes aux oscillations des régulateurs, dans certaines circonstances, ce qui est déplorable. Or, je le répète, dans tous mes travaux, je me préoccupe toujours, avant tout, de rendre ces oscillations impossibles dans tous les cas.

Je rappelle encore à ce sujet qu'il ne faut pas tenir compte seulement du volant de la machine : si la force vive des poulies de transmission est notable, elle peut suppléer à l'insuffisance du volant de la machine.

Si l'on a recours à l'emploi du régulateur de la *fig.* 9 (Pl. VII), il sera commode de le disposer comme on l'a vu, pour permettre de régler à la main, dans certaines limites, la vitesse de régime et l'écart relatif de vitesse.

Si l'on ne craint pas l'emploi d'un gros volant, ou bien si l'on peut se contenter d'une régularité médiocre, alors il est inutile d'avoir recours au régulateur à ressort; dans ce cas, les régulateurs de Porter à forte surcharge du manchon conviennent parfaitement.

§ 70. — **Cas des machines à grande vitesse.** — Pour les machines à grande vitesse, à un ou plusieurs cylindres, l'emploi des distributions à déclic n'est pas justifié. Le mieux est d'employer une distribution fixe et un régulateur à valve ou à soupape. Dans ce cas, à cause de la vitesse même, les perturbations du premier et du quatrième genres n'exigent qu'un très petit volant; il faut donc, dans ce cas, employer un régulateur à ressort à axe vertical ou, mieux encore, un régulateur dans le volant, afin de diminuer le plus possible la perturbation du deuxième genre; le calcul montre, dans ce cas, que le

volant peut se réduire à un poids extrêmement faible. Cette solution permet d'établir des machines à très bon marché, avec de petits cylindres et un volant très faible, et cependant très bien réglées.

On peut aussi employer un régulateur dans le volant agissant directement sur la distribution en modifiant le calage de l'excentrique ; il y a des machines modernes basées sur ce principe ; leurs tiroirs sont équilibrés ; les meilleures sont celles où le mouvement du régulateur au tiroir n'est pas réversible. Ce serait une erreur de croire que les machines à grande vitesse ne sont pas économiques, au point de vue de la consommation de combustible : en effet, si ces machines augmentent un peu les pertes de charge de la vapeur au passage des étranglements, elles ont, par contre, l'avantage de diminuer notablement les condensations à l'admission, ce qui est très important. On peut, du reste, la combiner avec l'emploi de chaudières à haute pression et de la condensation, ce qui permet d'obtenir, en fin de compte, une marche très économique.

En résumé, dans ce cas, il est vraiment dommage d'employer un régulateur à poids ; il vaut bien mieux employer un régulateur à ressort et à axe vertical, ou un régulateur à ressort dans le volant, systèmes que j'ai étudiés longuement ci-dessus.

Les régulateurs de Tangye et analogues, bien étudiés, peuvent rendre de grands services dans ce cas.

En ce qui concerne l'organe de réglage, je conseille une valve à *stabilité variable* dans la majorité des cas, et *ma soupape à stabilité variable* pour les petites machines, ou le réglage de la distribution comme ci-dessus.

Le lecteur se reportera à la quatrième partie pour l'étude du principe de ces appareils et à mon mémoire de 1887 pour y trouver tous les détails de construction de ces appareils, ainsi que des dessins à l'échelle permettant de fixer toutes leurs dimensions.



§ 71. — **Cas des machines où la régularité moyenne est seule nécessaire.** — Enfin, il arrive souvent que l'on demande à la machine une très grande régularité comptée non pas par seconde, mais par minute par exemple ; dans ce cas, c'est une régularité moyenne très grande qu'on demande, et non la régularité instantanée ; c'est le cas des ateliers d'ajustage et des éclairages électriques à incandescence.

Dans ce cas, on peut employer un volant très faible en ayant recours au régulateur Denis, dont nous avons parlé § 57. Cet appareil figurait déjà à l'exposition de 1878 ; il est trop connu pour qu'il me soit utile d'en donner la description.

Il faut dire cependant que, dans ce cas, le régulateur dans le volant peut rendre à peu près les mêmes services que le régulateur Denis, car il n'exige aussi qu'un volant très faible, quoique moins faible cependant que le régulateur Denis. Les deux systèmes peuvent, d'ailleurs, se combiner et permettre l'emploi d'un volant extrêmement faible avec une régularité moyenne, cependant très grande, comme l'ont fait MM. Weyher et Richmond. On n'a donc, dans ce cas, que l'embarras du choix entre les systèmes pour obtenir une très bonne régularisation avec un volant faible.

On comprend maintenant à quel point est vicieuse la méthode habituelle, qui consiste à commencer par choisir un régulateur voisin de l'isochronisme, puis à calculer le volant pour les perturbations du premier genre seulement et à s'imaginer qu'on évitera les oscillations en réglant à la main le frein à huile.

---

# APPENDICE.

## RÉGULATEURS DE TOUTES SORTES.

Tout ce qui précède concerne les régulateurs de vitesse des machines à vapeur ; mais la théorie s'applique aussi bien aux régulateurs des moteurs à air comprimé et des moteurs à gaz.

Pour les moteurs hydrauliques, j'ai montré, dans mon mémoire de 1878, quelle était la difficulté de la question, à cause des oscillations résultant de l'action indirecte du régulateur.

M. Léauté a fait sur ces appareils une remarquable étude (*Journal de l'École Polytechnique*, 55e cahier, 1885), étude à laquelle nous prions le lecteur de se reporter, s'il désire étudier à fond la question des oscillations de ces régulateurs.

Dans mon mémoire de 1887, j'ai proposé l'emploi d'un servo-moteur, pour permettre au régulateur d'avoir une action directe ou *simili-directe* sur la vanne ; de cette façon, le régulateur n'a à vaincre que la résistance du tiroir du servo-moteur, et il peut fonctionner aussi bien que les régulateurs à action directe des machines à vapeur.

L'emploi d'un servo-moteur à vapeur ou à air comprimé serait encore plus commode dans ce cas. Mais il faut bien remarquer qu'il s'agit ici d'un véritable servo-moteur, c'est-à-dire que les déplacements du gros piston du servo-moteur doivent suivre exactement et proportionnellement, sans aucun retard, les déplacements du tiroir du servo-moteur ou ceux du manchon du régulateur.

En outre, il faut que le volant constitué par l'ensemble des pièces en mouvement dans l'usine soit en rapport avec l'écart relatif de vitesse du régulateur d'après



les formules de la théorie qui précède, particulièrement celles de la quatrième partie.

Si l'on n'employait pas le servo-moteur, je recommanderais le système de M. Boudillat, signalé dans mon mémoire de 1887, et qui a les avantages de l'action directe du régulateur.

Dans mon mémoire de 1878, j'ai étudié longuement les régulateurs de pression, de température, etc. ; j'ai montré qu'ils devraient être établis d'après des principes absolument analogues à ceux qui devaient servir pour la construction des régulateurs de vitesse.

Plus tard, je publiai un mémoire intitulé : *Les Régulations dans les Distributions d'Électricité* (*Annales des Mines*, 8e série, t. XIII, 1888). Dans ce mémoire, j'ai étudié les divers régulateurs de force électromotrice et d'intensité électrique, puis les régulateurs de vitesse des moteurs électriques, les régulateurs des lampes à arc, etc. Le lecteur pourra se reporter à ce travail ; il trouvera de nombreuses analogies entre ces appareils et les régulateurs de vitesse des machines à vapeur.

Enfin, dans mon mémoire de mai 1895, spécialement rédigé pour l'Académie des Sciences, j'ai étudié brièvement les régulateurs de pression pour établir, dans ces appareils, la formule de la corrélation entre le régulateur de pression, la valve ou organe de réglage et le volant de pression. Je suis arrivé à la formule suivante, qui est de la même forme que les formules ci-dessus des perturbations du deuxième genre.

Le volant de pression, ou volume du réservoir de pression, est donné par la formule :

$$V = \frac{v}{2g}\sqrt{\frac{c}{\lambda\mu E^3}} \times \sqrt{\frac{1}{1+A}}.$$

Dans cette formule, $c$ est la course du piston ; E, l'écart relatif de pression du régulateur ; $\lambda$ et $\mu$, deux constantes

ayant la même signification que pour les régulateurs de vitesse ; $v$ est le débit maximum du fluide, en volume par seconde par l'orifice de sortie ; enfin, A est le rapport de la puissance du ressort au poids du piston du régulateur de pression. On voit donc que V est d'autant plus petit que A est plus grand.

En réalité, ma formule de la corrélation est absolument générale, pourvu que le régulateur soit à action directe et que son action soit assez rapide.

Je me réserve d'étudier un jour plus en détail les régulateurs de pression, de température, certains régulateurs électriques, etc., d'après tous les principes qui précèdent ; il n'y aura là qu'une application pure et simple des théories exposées dans le présent mémoire.

En résumé, les théories nouvelles que j'ai exposées contiennent tous les principes qui doivent guider les ingénieurs dans la construction des appareils automatiques de toute nature ; ils diffèrent notablement de ceux qui servaient de base jusqu'à présent à l'étude des régulateurs, des organes de réglage et du volant. J'espère que l'emploi de mes méthodes est appelé à rendre service dans l'industrie des machines.



# TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

INTRODUCTION ..... 391

DÉFINITIONS ET PRÉLIMINAIRES ..... 395

PREMIÈRE PARTIE.

**Étude des appareils régulateurs de vitesse à force centrifuge.**

I. — § 1. — *Principes généraux* ..... 398

II. — *Régulateurs de vitesse à boules et à poids* ..... 400
§ 2. — Régulateurs de Watt et de Porter ..... 400
§ 3. — Régulateurs de Farcot ..... 405
§ 4. — Régulateurs de Watt et de Porter à points de suspension séparés ..... 408
§ 5. — Régulateurs divers à boules et à poids ..... 409

III. — *Régulateurs de vitesse à boules, à poids et à ressorts* ..... 409
§ 6. — Calcul de ces appareils ..... 409
§ 7. — Régulateur à bielles croisées, à poids et à ressort. 410
§ 8. — Régulateur de Foucault ..... 412
§ 9. — Régulateurs à ressorts dans le volant ..... 412

DEUXIÈME PARTIE.

**Calcul du régulateur, des organes de réglage et du volant dans les machines où le régulateur agit directement sur la distribution au moyen d'un déclic.**

I. — *Théorie des régulateurs à maximum et à minimum* ..... 421
§ 10. — Cas d'une machine idéale ..... 421
§ 11. — Réalisation pratique des hypothèses précédentes. 424

II. — *Théorie des perturbations du premier genre de la position du manchon du régulateur* ..... 427
§ 12. — Théorie de ces perturbations ..... 427

Pages.
§ 13. — Applications ..... 430
§ 14. — Remarques ..... 435

III. — *Théorie des perturbations du deuxième genre de la position du manchon du régulateur* ..... 436
§ 15. — Définition des perturbations du deuxième genre.. 436
§ 16. — Evaluation de la vitesse maxima du manchon du régulateur ..... 437
§ 17. — Principe de la théorie des perturbations du deuxième genre ..... 444
§ 18. — Cas du régulateur de Porter ..... 447
§ 19. — Cas des régulateurs de Watt et de Farcot ..... 453
§ 20. — Discussion de la formule de la corrélation ..... 456
§ 21. — Cas des régulateurs à boules, à poids et à ressorts et du régulateur dans le volant ..... 462

IV. — *Théorie des perturbations du troisième genre de la position du manchon du régulateur* ..... 466
§ 22. — Définitions des perturbations du troisième genre.. 466
§ 23. — Action des frottements du régulateur ..... 466
§ 24. — Réaction de l'organe de déclic sur le manchon du régulateur ..... 468
§ 25. — Cas des régulateurs de Porter et analogues ..... 470
§ 26. — Cas des régulateurs de Watt et de Farcot ..... 471
§ 27. — Cas des régulateurs quelconques à boules et à poids ..... 472
§ 28. — Cas des régulateurs à boules, à poids, à ressorts et du régulateur dans le volant ..... 472

V. — *Théorie des perturbations du quatrième genre de la position du manchon du régulateur* ..... 473
§ 29. — Définition des perturbations du quatrième genre.. 473
§ 30. — Cas d'une machine à cylindre unique ..... 474
§ 31. — Cas d'une machine à deux cylindres ordinaires ... 479
§ 32. — Cas d'une machine compound ..... 479

VI. — *Résistance à la rupture du volant* ..... 480
§ 33. — Calcul de la jante au point de vue de la résistance. 480
§ 34. — Calcul des rayons au point de vue de la résistance ..... 481

VII. — *Résumé des calculs et applications pratiques* ..... 482
§ 35. — Choix de l'écart relatif de vitesse du régulateur suivant la nature de l'atelier ..... 482
§ 36. — Marche des calculs et applications pratiques avec régulateurs à boules, avec ou sans surcharge du manchon ..... 483
§ 37. — Marche des calculs avec régulateurs à ressorts ... 493



## TROISIÈME PARTIE.

**Calcul du régulateur, des organes de réglage et du volant dans les machines où le régulateur agit directement sur la distribution autrement que par un déclic.**

Pages.
I. — § 38. — *Nature de la distribution de ces machines* ..... 497
II. — § 39. — *Calcul du volant et du régulateur* ..... 499

## QUATRIÈME PARTIE.

**Calcul du régulateur, des organes de réglage et du volant dans les machines où le régulateur agit directement sur une valve ou soupape.**

I. — *Avantages et inconvénients des valves ou soupapes ordinaires* ..... 499
§ 40. — Avantages et inconvénients au point de vue des qualités générales de la machine à vapeur ..... 499
§ 41. — Avantages et inconvénients au point de vue de la régularité et de la vitesse ..... 500

II. — *Théorie de la corrélation entre le régulateur, la valve ou soupape équilibrée et le volant ; calcul de ces organes.* 503
§ 42. — Variation de la force motrice de la machine en fonction du déplacement du manchon du régulateur ..... 503
§ 43. — Théorie nouvelle de la corrélation ..... 507
§ 44. — Influence de la grandeur de la valve ou soupape sur le poids à donner au volant ..... 514
§ 45. — Marche des calculs avec régulateurs à boules avec ou sans surcharge du manchon ..... 516
§ 46. — Marche des calculs avec régulateurs à boules et à ressorts ..... 517

III. — *Valves et soupapes à stabilité variable* ..... 519
§ 47. — Compensation des valves par un système de leviers. 519
§ 48. — Compensation des vannes par des orifices en pointes. 519
§ 49. — Valve à stabilité variable ..... 519
§ 50. — Soupape à stabilité variable ..... 521

IV. — *Calcul du régulateur de la valve ou soupape à stabilité variable et du volant* ..... 522
§ 51. — Etude de la corrélation ..... 522

Pages.

§ 52. — Marche des calculs avec régulateurs à boules et à poids, avec ou sans surcharge du manchon..... 527
§ 53. — Marche des calculs avec régulateurs à boules et à ressorts..... 532

V. — § 54. — *Remarques et dispositions pratiques des valves et des leviers*..... 533

## CINQUIÈME PARTIE.

### Régulateur agissant indirectement sur la distribution.

I. — § 55. — *Ancien régulateur à embrayages*..... 534
II. — § 56. — *Nouveaux systèmes de régulateurs à action indirecte*..... 535

## SIXIÈME PARTIE.

### Régulateurs de systèmes divers.

I. — § 57. — *Régulateur Denis pour machines à vapeur*..... 536
II. — § 58. — *Régulateurs pour machines à vapeur non basés sur la force centrifuge*..... 536

## SEPTIÈME PARTIE.

### Formules générales et applications.

I. — *Formules générales du régulateur d'un système quelconque, des organes de réglage et du volant, le régulateur étant à force centrifuge et à action directe*..... 537
§ 59. — Courbe de la vitesse en fonction de la position du manchon du régulateur..... 537
§ 60. — Puissance du régulateur..... 540
§ 61. — Théorie des perturbations du deuxième genre..... 541
§ 62. — Perturbations du premier et du quatrième genre.. 543
§ 63. — Théorie des perturbations du troisième genre.... 543

II. — *Applications*..... 544
§ 64. — Application au régulateur d'Andrade..... 544
§ 65. — Application au régulateur de Proell, etc..... 548



Pages.

§ 66. — Application au régulateur Tangye et analogues... 550
§ 67. — Applications diverses au moyen d'un calcul rapide. 554

III. — *Choix du régulateur suivant les cas*..... 556
§ 68. — Cas des machines à vitesse modérée et à cylindre unique..... 556
§ 69. — Cas des machines à vitesse modérée et à deux ou plusieurs cylindres ordinaires ou compound... 558
§ 70. — Cas des machines à grande vitesse..... 559
§ 71. — Cas des machines où la régularité moyenne est seule nécessaire..... 561

## APPENDICE.

**Régulateurs de toutes sortes**..... 562

# BULLETIN

## LA COLLECTION DES GITES MINÉRAUX ET MÉTALLIFÈRES A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE DES MINES

Par M. L. DE LAUNAY,
Ingénieur des Mines, professeur à l'École supérieure des Mines.

La collection des gîtes minéraux et métallifères de l'École des Mines est d'une organisation si récente et si peu connue des ingénieurs auxquels elle s'adresse qu'il nous paraît utile, à l'occasion de son ouverture récente au public, d'en indiquer le caractère et l'intérêt pratique autant que théorique. Son catalogue, que nous donnons ici, permettra, en outre, à tous ceux qui s'occupent à un titre quelconque des substances minérales de pouvoir rapidement et sans vaines recherches, mettre à profit les richesses qu'elle renferme ; nous espérons qu'ils voudront bien, à cette occasion, nous aider à combler les lacunes qui peuvent encore s'y rencontrer.

Dans sa notice historique sur l'École des Mines (*) M. Aguillon a rappelé comment la première idée d'une collection de ce genre remonte à Le Play, qui, de 1840 à 1853, constitua un *musée de l'industrie minérale* de plus de 22.000 échantillons. « Ce musée formait, dit-il, des suites naturelles partant des matières premières, combustibles et minerais, ou mieux, pour ceux-ci, des gîtes métallifères pour arriver aux produits finis, en suivant la transformation des matières successives élaborées et des produits intermédiaires... Le classement était fait systématiquement à un double point de vue : d'une part, au point de vue métallurgique ou minéralogique par nature de produit final (fer, plomb, etc...); et, d'autre part, au point de vue statistique, par district métallurgique ou minéralurgique. »

(*) *Annales des Mines*, mai-juin 1889, p. 152 et 243.



Il était presque impossible de tenir au courant une collection dont le principe était aussi vaste ; aussi y renonça-t-on assez vite pour se borner à une collection dite des gîtes minéraux (*), conçue à un point de vue simplement géologique. L'idée, reprise sous cette forme nouvelle par de Chancourtois, reçut sa réalisation par les soins d'Ed. Fuchs, qui, pendant les neuf années où il professa à l'École des Mines le cours de géologie appliquée, de 1879 à 1889, s'occupa très activement de recueillir les échantillons destinés à faire connaître méthodiquement les principaux gîtes minéraux de tous les pays.

Depuis sa mort subite en 1889, nous avons continué son œuvre avec l'actif concours de notre distingué préparateur, M. Durassier, qui a bien voulu dresser le catalogue ci-joint; les matériaux en étaient déjà très nombreux ; nous avons été assez heureux, grâce à la générosité de tous les industriels et exploitants de mines auxquels nous avons fait appel, grâce à nos propres voyages à l'étranger, pour pouvoir les accroître encore et les classer entièrement sous une forme systématique.

Ce classement, le premier catalogue ci-joint le fera suffisamment connaître sans autre explication. Il correspond exactement à celui que nous avons adopté dans notre *Traité des Gîtes minéraux et métallifères*, c'est-à-dire que les gisements sont rangés suivant l'ordre de la chimie, d'après le métalloïde ou le métal dominant dans chaque gîte.

Les échantillons sont répartis dans cinq salles, A, B, C, D, E, et, dans chacune, ils occupent un certain nombre de vitrines murales et de tables d'embrasure numérotées en chiffres romains (par exemple A-IX à A-XII, vitrines du phosphore; D-t. III, table d'embrasure du bismuth), plus des vitrines centrales et des trophées placés devant les fenêtres.

A l'entrée de chaque salle, une pancarte suspendue indique les principales collections qui y sont renfermées avec leur place. Chaque vitrine porte, en haut, le nom du métal ou métalloïde qui y figure et, à chaque tablette, on voit, inscrite sur le verre même, la subdivision correspondante (telles que graphite, jais, bitume, asphalte, etc..., quand il s'agit du carbone). Ayant ainsi reconnu

(*) Les échantillons de Le Play avaient, en outre, l'inconvénient pratique d'être beaucoup trop petits. Comme ils ne peuvent plus présenter qu'un intérêt historique, nous avons dû, faute de place dans nos salles, les faire rassembler dans une série de caisses, soigneusement numérotées et cataloguées, où on les retrouvera à l'occasion.

approximativement la place du gisement que l'on cherche, on n'a plus qu'à lire quelques-uns des étendards disposés en tête de chaque série d'échantillons pour trouver ce gisement lui-même.

A ce premier catalogue par ordre de classement, nous en joignons deux autres, l'un par pays, l'autre par ordre alphabétique des noms de gisements, de telle façon que cette sorte de table à triple entrée permet : 1° d'étudier ensemble et de comparer les divers gîtes d'une substance donnée existant dans le monde; 2° de savoir quelles substances minérales on rencontre dans un pays donné; et 3° de découvrir immédiatement un gisement donné, quand même on en saurait simplement le nom, ignorant et la substance qu'on y exploite et le pays où il se rencontre.

Nous ajouterons encore que, comme complément à cette collection, nous avons commencé à organiser, indépendamment de la Bibliothèque générale de l'École des Mines, une bibliothèque spéciale des gîtes minéraux, où nous essayons de recueillir et de classer toutes les monographies, les plans et les cartes qui les concernent.



# CATALOGUE DE LA COLLECTION

## NOMENCLATURE

PAR

ORDRE DE CLASSEMENT

## ENTRÉE

### Généralités

TABLE D'EMBRASURE

Formes diverses des gîtes : Inclusions ; — Filons ; — Sédiments.

TABLE CENTRALE

Dépôts de sources thermales.
Quartz des différents âges.

VITRINES MURALES

Travaux synthétiques de M. A.-B. de Chancourtois.
Vis tellurique.

### Salle A

VITRINES MURALES

#### A-I. — Eaux minérales

#### A-II. — Soufre

1° *Solfatares*

| | |
|---|---|
| Lac Bolzano (Pr. de Rome). | N° 1535 |
| Palerme (Env. de) (Sicile). | N° 1731 |
| Bagnères-de-Luchon (H^tes-Pyrénées). | N° 1810 |
| Saint-Béat (H^te-Garonne). | N° 1333 |
| Naples (Italie). | N° 1542 |

2° *Solfares*

| | |
|---|---|
| Pampinello (Env. Palerme). | N° 1741 |
| Villarosa (Pr. de Palerme). | N° 1782 |
| San Cataldo (Pr. Palerme). | N° 1783 |
| Swordrowitz (Galicie). | N° 1784 |
| Saint-Martin de Renacas (Basses-Alpes). | N° 1334 |
| Les Tapets (Vaucluse). | N° 1335 |
| Saignon (Vaucluse). | N° 1336 |
| Naples (Italie). | N° 1542 |
| Tana (Nouvelles-Hébrides). | N° 1239 |

#### A-III. — Soufre. — Fluor. — Bore. — Carbone

1° *Pyrites de fer*

| | |
|---|---|
| Mayet-en-Montagne (Allier). | N° 1533 |
| Saint-Bel (Rhône). | N° 1324 |

2° *Fluor*

| | |
|---|---|
| Zacatecas (Mexique). | N° 1303 |
| Derbyshire (Gr.-Bretagne). | N° 1302 |
| Nottinghamshire (Grande-Bretagne). | N° 1301 |
| Gar-Rouban (Oran). | N° 1811 |

Grande-Vernissière (Gard). N° 1813
Urson (Puy-de-Dôme). N° 1814
Marsanges (Haute-Loire). N° 1514
Langeac (Haute-Loire). N° 1689

3° *Bore*

Chili. N° 1042
Columbus (Californie). N° 1815
San-Francisco (Californie). N° 1037
Azizié (Asie-Mineure). N° 1038

4° *Sables diamantifères*

Diamantina (Minas Geraes). N° 1671
Bahia (Brésil). N° 1672

### A-IV. — Carbone

1° *Sables diamantifères*

Salobro (Brésil). N° 1816

2°, 3°, 4° *Diamants dans les roches*

Jagers et Coffee-Fontein (Etat libre d'Orange). N° 1714
Kimberley (Le Cap). N° 1662

### A-V. — Carbone

1° *Graphite*

Krummau (Bohême). N° 1778
Yen-Bai (Tonkin). N° 1332
Sonoma County (Californie). N° 1640
Tuolumne County (Calif.). N° 1817
Raleigh (Caroline-du-Nord). N° 1818
Amenak (Groenland). N° 1423
Rifkoh (Groenland). N° 1550
Julianshaab (Groenland). N° 1552

2° *Jayet*

Cabo Mendezo (Portugal). N° 1819
Suderœ (Iles Feroë). N° 1551

3° *Lignite*

Elnbogen (Autriche). N° 1821

4° *Pétrole*

Solontza (Roumanie). N° 1913
Boryslaw (Galicie). N° 1790
Bacou (Caucase). N° 1000

5° *Ozocérite*

Boryslaw (Galicie). N° 1791
(Italie). N° 1555

6° *Ambre*

Samland (Prusse). N° 1792

### A-VI. — Carbone

1° *Bitume*

Kaupina (Roumanie). N° 1612
Bois d'Asson (B^es-Alpes). N° 1516
Lac-de-la-Braie (Trinidad). N° 1663
Aïn-zeft-Dahra (Oran). N° 1822
Pont-du-Château (Puy-de-Dôme). N° 1823
Buena-Vista (Californie). N° 1824
Sandstone (Californie). N° 1825
Sandstone (Californie). N° 1826

2° *Cannel Coal*

Albert-mine (New-Brunswick). N° 1820

3° *Boghead*

Bathvale (Ecosse). N° 1831
Makarka (Iowa). N° 1832

### A-VII. — Carbone

1° *Asphalte*

Seyssel (Ain). N° 1788
Letto Manopello (Abruzzes). N° 1725
Val Romano (Abruzzes). N° 1789
Mer Morte (Palestine). N° 1827
Porentruy (Neuchatel). N° 1828

2° *Schistes bitumineux*

Autun (Saône-et-Loire). N° 1727
Buxière-la-Grue (Allier). N° 1829
Menat (Puy-de-Dôme). N° 1830
Abou-Abla (Syrie). N° 1343

3° *Résines*

Kaori (G^ne de) (Nouvelle-Calédonie). N° 1794

### A-VIII. — Silicium

1° *Quartz*

Aanderud (Norwège). N° 1802
Djebel-Khanil (Tunisie). N° 1836
Puebla (Mexique). N° 1835
Zacatecas (Mexique). N° 1834

2° *Bois silicifié*

Tunisie. N° 1833



3° *Tripoli*

Menat (Puy-de-Dôme). N° 1840
Marsanne (Drôme). N° 1872

4° *Opale*

Mexique. N° 1286

5° *Feldspaths*

Aanderud (Norwège). N° 1801
Linnestad-Rawkestad (Norwège). N° 1837
Odiby-Isek (Norwège). N° 1838
Cekmeda-Spelbe (Norwège). N° 1839
Linnestad-Gasitesstad (Norwège). N° 1287

6° *Obsidienne*

Zinaparo (Mexique). N° 1841
Puebla (Mexique). N° 1842
Posevavats (Serbie). N° 1337

7° *Ponce*

N° 1843

8° *Meulière*

Grèce. N° 1288

9° *Mica*

Tajova (Transylvanie). N° 1701

10° *Granite*

Vosges. N° 1702
Dielette et Flamanville (Manche). N° 1703

11° *Amiante*

Mont-du-Lys (Barèges) (H^te-Garonne). N° 1844
Arado de Castanheira (Portugal). N° 1845
Pietra Mala (Bastia). N° 1290
Zacatecas (Mexique). N° 1289

12° *Emeraude*

Moss (Norwège). N° 1293

13° *Ardoise*

Buckingham. N° 1291
Piscataquis (Maine). N° 1292

14° *Pierres à aiguiser*

Porsgrund (Norwège). N° 1849
Frederiksstad (Norwège). N° 1300
Caen (Env.) (Calvados). N° 1021

15° *Talc*

La Garde (Isère). N° 1522
La Voute-Chilhac (H^te-Loire). N° 1685

### A-IX. — Phosphore

1°, 2°, 3°, 4° *Apatites*

Oddegarden (Norwège). N° 1744
Krageroe (Norwège). N° 1508
Buckingham (Canada). N° 1851
Samorade (Orel) (Russie). N° 1852

### A-X. — Phosphore

1°, 2°, 3°, 4° *Phosphorites*

Logrosan (Espagne). N° 1597
Cacerès (Espagne). N° 1678
Castillo de Belmez (Espagne). N° 1676
Penaflor (Espagne). N° 1609
Quercy (Lot et Tarn-et-Garonne). N° 1854

### A-XI. — Phosphore

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes sédimentaires*

Eckholshausen (Nassau). N° 1557
Djebel Toumaï (Oran). N° 1857
Montigny-sur-Armançon (Côte-d'Or). N° 1856
Quissac (Gard). N° 1855
Lirac et Tavel (Gard). N° 1704
Grandpré (Ardennes). N° 1859
Beauval (Somme). N° 1294
Cuchevilliers (Somme). N° 1862
Hardivilliers (Oise). N° 1861
Ciply (Hainaut). N° 1656
Djebel Stah (Tunisie). N° 1864
Skarna (Tunisie). N° 1865
Zaouich-bou-Medine (Tunisie). N° 1866
Djebel Seldjà (Tunisie). N° 1867

### A-XII. — Phosphore

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes sédimentaires*

Souk-Ahras (Constantine). N° 1863
Djebel Tadjira (Constantine). N° 1858
Inkermann (Alger). N° 1295
Kuraçao (Antilles). N° 1868

Charlestown (Caroline du Sud). N° 1618
Floride (Etats-Unis). N° 1296
Tebessa (Constantine). N° 1853
Gourbesville et Orglandes (Manche). N° 1869
Navassa (Antilles). N° 1870
Ridonda (Mexique). N° 1871

**A-XIII. — Potassium. — Sodium. — Lithium.**

1° *Sels de Stassfurt*

Stassfurt (Anhalt). N° 1513

2° *Sels gemmes*

Bex (Neuchatel) N° 1553
Oued Khebad (Constantine). N° 1876
El Outaya (Constantine). N° 1875
Milah (Constantine). N° 1341
Coudiat-Hamacima (Tunisie). N° 1342
Berchtesgaden (Tyrol). N° 1800
Slanic (Roumanie). N° 1715
Maros-Ujvar (Transylvanie). N° 1873
Ranaszet (Transylvanie). N° 1297
Solgatayan (Transylvanie). N° 1298

3° *Sel de lithine*

Montebras (Creuse) N° 1805

**A-XIV. — Baryum. — Strontium. — Magnésium**

1° *Sels gemmes* (Suite)

Pampinello (Sicile). N° 1740
(Hongrie). N° 1299
Djebel Sanari (Alger). N° 1686

2° *Glaubérite*

Cienpozuelos (Espagne). N° 1673

3° *Barytine*

Djebel Slata (Tunisie). N° 1877
Fleurus (Belgique). N° 1879
La Malou (Hérault). N° 1259
Boverback. N° 1878
Fendanka (H$^{t}$-Sénégal). N° 1258

4° *Strontianite*

Ahlen (Westphalie). N° 1684

5° *Célestine*

Vigan (Gard). N° 1880
(Gard). N° 1874
Condorcet. N° 1325
Palerme (Env. de) (Sicile). N° 1730

6° *Giobertite*

Beni Saïd (Constantine). N° 1881
Mandoudi (Ile d'Eubée). N° 1882

7° *Magnésite*

Esky Cheir (Asie-Mineure). N° 1326
(Isthme de Corinthe). N° 1883
Smyrne (Asie-Mineure). N° 1327

8° *Serpentine*

Aïn-Sedma (Constantine). N° 1884

**A-XV. — Calcium**

1°, 2°, 3°, 4° *Pierres à bâtir*

Divers (France). N° 1885

**A-XVI. — Calcium**

1° *Pierre à chaux*

Divers (France). N° 1260
Les Moulineaux (Seine). N° 1887

2° *Pierres à ciments*

Trifail (Styrie). N° 1888
Corbiguy (Nièvre). N° 1889
St-Victor-la-Coste (Gard). N° 1890
Balcony-Falls (Virginie). N° 1261

3° *Craie*

Meudon (Seine). N° 1891
Sangate (Sussex). N° 1262

4° *Pierres lithographiques*

Solenhofen (Bavière). N° 1893
Ravin bleu près Batna (Algérie). N° 1894
Bancs rouges (Gard). N° 1895
Ile Malo (N$^{lle}$-Calédonie). N° 1566
Ile S$^{te}$-Marie (N$^{lle}$-Calédonie) N° 1567

5° *Aragonite*

Dannemarie (Eure-et-Loir). N° 1264

**A-XVII. — Calcium**

1°, 2°, 3°, 4° *Gypses*

Echternach. N° 1265



Copiapo (Chili). N° 1266
Leogang (Salzbourg). N° 1267
Mers-el-Khebir (Oran). N° 1902
Fleurus (Oran). N° 1903
Karonbo (Oran). N° 1268
Bou Thelis (Oran). N° 1905
Christel (Oran). N° 1904
Beni Saf (Oran). N° 1344
Rovigo (Alger). N° 1809
Milah (Constantine). N° 1345
Amoura. N° 1346
Harrouch. N° 1347
Beni Mimoun (Constantine). N° 1185
Zerouala (Petite Kabylie). N° 1901
Djebel Amar (Tunisie). N° 1909
Monastir (Tunisie). N° 1221
Djebel Hammam (Tunisie). N° 1269
Zacatecas (Mexique). N° 1908
Huchuctlan (Puebla). N° 1907
Xicotlan (Puebla). N° 1270
Palaiseau (Seine-et-Oise). N° 1912
Yvette (vallée de l'). N° 1911
Iglo (Transylvanie). N° 1906
Divers. N° 1150

**A-XVIII. — Calcium**

1°, 2°, 3°, 4° *Marbres*

Gabès. N° 1271
Aureilles (B$^{hes}$-du-Rhône). N° 1273
Saint-Beat (Haute-Garonne). N° 1274
Valais (Suisse). N° 1275
Labarthe (H$^{tes}$-Pyrénées). N° 1276
Castera-Vestujan (Drôme). N° 1277
Filfila (Constantine). N° 1896
Djebel Orousse (Oran). N° 1278
Djebel Chenouah (Alger). N° 1279
Posa del Norte (Chihuahua). N° 1280
Aïn Sba (Oran). N° 1898
Sidi-Brahim (Oran). N° 1282
Tekbalet (Oran). N° 1899
Djebel Telfat (Constantine). N° 1900
Pursatt (Cambodge). N° 1283
Akiyoshi (Japon). N° 1328
(Transylvanie). N° 1284
Ossau (Vallée d'). N° 1285
Villapourçon (Nièvre). N° 1263

## Salle B

VITRINES MURALES

**B-I. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Fer dans les roches*

Arendal (Côte d') (Norwège). N° 1509
Meboudga (Constantine). N° 1711
Aïn Sedma (Constantine). N° 1712
(Constantine). N° 1713

**B-II. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Fer dans les roches*

Moravicza (Hongrie). N° 1142
Marmaros Sziget (Hongrie). N° 1143
Tiszolez (Hongrie). N° 1144

**B-III. — Fer**

1° *Fer dans les roches*

Rohnicz (Hongrie). N° 1145
Rimamurany (Hongrie). N° 1050
Brasso (Hongrie). N° 1147
Libethbanya (Hongrie). N° 1148
Kotterbach (Hongrie). N° 1154

2° *Fer dans les roches*

Traverselle (Piémont). N° 1541

3°, 4° *Fer dans les roches*

Traverselle (Piémont). N° 1518

**B-IV. — Fer**

1° *Fer dans les roches*

Traverselle (Piémont). N° 1518

2°, 3°, 4° *Fer dans les roches*

Traverselle (Piémont). N° 1729

**B-V. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes de contact*

(Hongrie). N° 1149
(Croatie). N° 1051
(Chili). N° 1004
(Silésie). N° 1573
Cerro de Mercado (Durango). N° 1152
Textillan (Oajaca). N° 1320
Zacatecas (Mexique). N° 1321
Zacatecas (Mexique). N° 1322

**B-VI. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Allevard (Isère). N° 1914
(Chine). N° 1153
Ganara (Tunisie). N° 1156
Kef Debba (Tunisie). N° 1158
Djebel Hamrya (Tunisie). N° 1157
Dobschau (Hongrie). N° 1601
Argut (Haute-Garonne). N° 1159
Ainhoa (Basses-Pyrénées). N° 1624
La Tour-Batère (Pyrénées-Orientales). N° 1160
Rivernert (Ariège). N° 1019

**B-VII. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Rancié (Ariège). N° 1690
Château-Verdun (Ariège). N° 1015

**B-VIII. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Prades (Canigou) (Pyrénées-Orientales). N° 1570
Fillols (Canigou) (Pyrénées-Orientales). N° 1622

**B-X. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Amas dans les terrains primitifs*

Dannemora (Suède). N° 1746
Norberg (Suède). N° 1748
Gellivara (Suède). N° 1747
(Australie). N° 1155
Lac Champlain (New-York). N° 1529

**B-XI. — Fer**

1°, 2° 3°, 4° *Amas dans les terrains primitifs*

Dalécarlie (Suède). N° 1161
Marnas (Suède). N° 1621
Douar Medjadja (Const.). N° 1351
Maouaria (Constantine). N° 1352
Vaussujean (Creuse). N° 1184
Framont (Vosges). N° 1515
M'rabdine (Alger). N° 1625
Aïn Oudrer (Alger). N° 1353
Devil's head Montain (Colorado). N° 1014
Saumane (Gard). N° 1165
Elisabethpol (Caucase). N° 1128
Camerata (Oran). N° 1916
Beni-Mimoun (Constantine). N° 1354
Ouled Nouar (Constantine). N° 1355
Chabet Queraï. N° 1356

**B-XII. — Fer**

1° *Gîtes sédimentaires*

Lac Supérieur (Michigan). N° 1338
Lac Supérieur (Michigan). N° 1598

2° *Gîtes sédimentaires*

Mokta-el-Hadid (Const.). N° 1945
San Thiago (Portugal). N° 1635

3° *Gîtes sédimentaires*

Seriphos (Grèce). N° 1669

4° *Gîtes sédimentaires*

Brésil. N° 1357
Segré (Maine-et-Loire). N° 1162
Diélette (Manche). N° 1918

**B-XIII. — Fer**

1° *Gîtes sédimentaires*

Diélette (Manche). N° 1918

2°, 3° *Gîtes sédimentaires*

Parkside (Cumberland). N° 1920
Saarbruck (Lorraine). N° 1147

4° *Gîtes sédimentaires*

Neunkirchen (Siegen). N° 1164
Fins. N° 1166
Portes (Gard). N° 1167
Saint-Eloy (Allier). N° 1168
Bezenet (Allier). N° 1169
Combes (Aveyron). N° 1170

**B-XIV. — Fer**

1°, 2° *Gîtes sédimentaires*

Cᵐᵉ de Pologne (Varsovie). N° 1171

3° *Gîtes sédimentaires*

Dombrowa (Silésie). N° 1172
Tarnowitz (Varsovie). N° 1173

4° *Gîtes sédimentaires*

Merzelet (Ardèche). N° 1921



Fumel (Tarn). N° 1174
Bordezac (Gard). N° 1175
Bab M'Teurba (Oran). N° 1358
Beni Saf (Oran). N° 1359
Saligny (Allier). N° 1527
Thostes (Côte-d'Or). N° 1923
Briey (Meurthe-et-Moselle). N° 1657
Chavigny (Meurthe-et-Moselle). N° 1924

**B-XV. — Fer**

1° *Gîtes sédimentaires*

Mazenay (Saône-et-Loire). N° 1922
Hayange (Lorraine). N° 1779
Chalindrey (Haute-Saône). N° 1161

2° *Gîtes sédimentaires*

Tazout (Oran). N° 1360
Kandirou (Constantine). N° 1361
Gimouille (Nièvre). N° 1180

3° *Gîtes sédimentaires*

Ouarsenis (Alger). N° 1362
Ougney (Jura). N° 1926
Saint-Priest (Ardèche). N° 1176
Mondalazac (Aveyron). N° 1928
Izenay (Nièvre). N° 1177
Privas (Ardèche). N° 1179
Veyras (Ardèche). N° 1178
La Voulte (Ardèche). N° 1929
Sidi Saf (Oran). N° 1368

4° *Gîtes sédimentaires*

Vassy (Haute-Marne). N° 1930
Djebel Temoulga (Alger). N° 1363
Oued Rouina (Alger). N° 1364
Zaccar Rharb (Alger). N° 1365
Sidi Sliman (Alger). N° 1366
Lacs de Russie. N° 1183

**B-XVI. — Fer**

1° *Gîtes sédimentaires*

Soumah (Alger). N° 1369
Bouïnan (Alger). N° 1370
Oued Djer (Alger). N° 1371

2° *Gîtes sédimentaires*

Somorrostro (Bilbao). N° 1932

3° *Gîtes sédimentaires*

Gourraya (Alger). N° 1917
Beni Aquil (Alger). N° 1372
Aïn Sadouna (Alger). N° 1373

4° *Gîtes sédimentaires*

Larrhat (Alger). N° 1374
Djebel Hadid (Alger). N° 1375
Cap Tenez (Alger). N° 1376
Messelmoun (Alger). N° 1377
Saint-Florent (Cher). N° 1378
Exincourt (Doubs). N° 1379
Oued Zouara (Tabarca). N° 1380
Monts-en-Ternois (Pas-de-Calais). N° 1716
Yeffi (Oran). N° 1381
Pourain (Yonne). N° 1382
Flogny (Yonne). N° 1383

**B-XVII. — Fer**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes sédimentaires*

Calamita (Ile d'Elbe). N° 1933

VITRINES MURALES ISOLÉES

**B-IX. — Chrome. — Titane. — Tungstène**

1° *Chrôme*

Euch-el-Bez (Constantine). N° 1384
Berezowsk (Russie). N° 1717
Shasta (Californie). N° 1936
Les Ecouchets (Saône-et-Loire). N° 1945
Roräas (Suède). N° 1186
Helene (Nlle-Calédonie). N° 1523
Canala (Nlle-Calédonie). N° 1524
St-Vincent (Nlle-Calédonie). N° 1187
(Serbie). N° 1385
(Asie-Mineure) N° 1188
Baltimore (Maryland). N° 1189
(Oural). N° 1190
(Inde). N° 1191
Skyros (Grèce). N° 1192

2° *Titane*

Egersund (Norwège). N° 1949
Kragerœ (Norwège). N° 1534
Dear Park (Maryland). N° 1193
Rock Springs (Maryland). N° 1194

3° *Tungstène*

Bonnac (Corrèze). N° 1742
Meymac (Corrèze). N° 1728
East Pool (Cornwall). N° 1545
Puy-les-Vignes (Hte-Vienne). N° 1943
Vaulry (Hte-Vienne). N° 1722

4° *Uranium*

Montcenis (Saône-et-Loire). N° 1386

**B-XVIII. — Aluminium**

1° *Kaolins*

Saint-Yrieix (Hte-Vienne). N° 1937
(États-Unis). N° 1196
(Asie-Mineure). N° 1197
Petite Kabylie (Algérie). N° 1198

2° *Argiles réfractaires*

(Bohême). N° 1199
Le Teil (Ardèche). N° 1200
Sarreguemines (Lorraine). N° 1215
Couronne de Pologne (Varsovie). N° 1216
Blatoush (Oural). N° 1217
Biso (Espagne). N° 1218
Vallendar. N° 1219

3° *Emeri*

Naxos (Grèce). N° 1220
Bereghszasy (Hongrie). N° 1221

4° *Alunite*

La Tolfa (Rome). N° 1938

5° *Bauxite*

Les Baux (Bouch.-du-Rh.). N° 1222
Le Morre (Hérault). N° 1223
Villevayrac (Hérault). N° 1224

6° *Cryolithe*

Evigtok (Groenland). N° 1225

TABLES D'EMBRASURES

**B-t.I. — Manganèse**

Capo rosso (Sardaigne). N 1700
Argut (Haute-Garonne). N° 1387
Adervielle (Htes-Pyrénées). N° 1630
Romanèche (S.-et-L.). N° 1389
Kvirili (Caucase). N° 1940
Espié (Trébizonde). N° 1732
San-Luiz (Rép. Argentine). N° 1390
Voile-Noiro (Constantine). N° 1391
La Couraya (Constantine). N° 1626
Azib-Zamoun (Alger). N° 1627
Bouzarea (Alger). N° 1628
Sarre (Lorraine). N° 1392
Saint-Quentin (Aisne). N° 1393
Las Cabesses (Ariège). N° 1017
Rimont (Ariège). N° 1020
Mayet-en-Montagne (Allier). N° 1532
Semipalatinsk (Sibérie). N° 1668

**B-t.II. — Nickel-Cobalt**

Bamble (Norwège). N° 1394
Canala, etc. (Nlle-Calédonie). N° 1942
Negrilla (Catamarca). N° 1616
Ringerike (Norwège). N° 1941
Schneeberg (Saxe). N° 1339
Dobschau (Hongrie). N° 1602
Usseglio (Piémont). N° 1030
El Binta, Coquimbo (Chili). N° 1939
Les Challanches (Isère). N° 1649
Palhal (Portugal). N° 1395
Owari (Japon). N° 1584
Port-Bouquet (Nlle-Caléd.). N° 1556
Grande-Adélaïde (Nlle-Cal.). N° 1558

VITRINES CENTRALES

**Régions métallifères**

I

Minerais et produits métallurgiques de la Suède.

II

Laurium (Grèce).

TROPHÉES

I. — Fer

Mazenay (Saône-et-Loire).

II. — Nickel

Nouvelle-Calédonie.

III. — Argent

Comstock (États-Unis).



IV. — Or

Minas Geraes (Brésil).

**Salle C**

TABLES D'EMBRASURES

**C-t.I. — Étain**

Carn Brea (Cornwall). N° 1803

**C-t.II. — Étain**

Dolcoath (Cornwall). N° 1016
Mellenaer (Cornwall). N° 1528
La Villeder (Morbihan). N° 1679
Altenberg (Saxe). N° 1323
Chorulque (Bolivie). N° 1808
Oruro (Bolivie). N° 1807
Montebras (Creuse). N° 1805
Penuta (Galice). N° 1946
San Manuel (Galice). N° 1946

**C-t.III. — Étain**

Pentes (Galice). N° 1946
Campiglia (Toscane). N° 1629
Minosaka (Japon). N° 1695
Penestin (Morbihan). N° 1604
Puloh Brani (Perak). N° 1947
Bangka (Malacca). N° 1510
Billiton (Malacca). N° 1520
Perak (Malaisie). N° 1804
Petaï (Perak). N° 1561
Guntang (Perak). N° 1562
Cleydang (Perak) N° 1563
Piriac (Loire-Inférieure). N° 1745
Vaulry (Hte-Vienne). N° 1751

VITRINES MURALES

**C-I. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Amas dans les roches*

Monte-Catini (Toscane). N° 1806

**C-II. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Amas dans les roches*

Monte-Catini (Toscane). N° 1806
Rocca Tederighi (Toscane). N° 1620
Bocchegiano (Toscane). N° 1331
Terricio (Toscane). N° 1948
Ponte-alle-Lecchia (Corse). N° 1583
La Prugne (Allier). N° 1531

**C-III. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Pilou (Nouvelle-Calédonie). N° 1949
Bogoslowsk (Oural). N° 1950
Iekaterinenbourg (Perm). N° 1951

**C-IV. — Cuivre**

1° *Gîtes filoniens*

Gollnitz (Hongrie). N° 1341

2° *Gîtes filoniens*

Cap Tenez (Alger). N° 1952
Oued-Allelah (Alger). N° 1087

3° *Gîtes filoniens*

Oued-bou-Allou (Alger). N° 1088
Mouzaia (Alger). N° 1962
Oued-Melah (Alger). N° 1089
Oued-Merdja (Alger). N° 1090
Oued-Kebir (Alger). N° 1091
Djebel-Hadid (Alger). N° 1092

4° *Gîtes filoniens*

Kef-oum-Teboul (Const.). N° 1781
Beni-Mimoun (Constantine). N° 1096
Cheraia (Constantine). N° 1097
Abla (Oran). N° 1093
Aïn Barbar (Constantine). N° 1749
(Oran). N° 1094
Oued-K'Soub (Oran). N° 1095

**C-V. — Cuivre**

1° *Gîtes filoniens*

Leogang (Salzbourg). N° 1098

2° *Gîtes filoniens*

Acton (Canada). N° 1099

3° *Gîtes filoniens*

Tolède (Nlle-Castille). N° 1547
Xerès-Lanteira (Andalousie). N° 1343
Kanagassi (Japon). N° 1100
Sassagatani (Japon). N° 1102
Adakæ (Japon). N° 1102
Bien-Dong (Tonkin). N° 1103

4° *Gîtes filoniens*

Côte occidentale (Sumatra). N° 1512
(Bolivie). N° 1104
(Bolivie). N° 1131

**C-VI. — Cuivre**

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Tamaya (Chili). N° 1953

3° *Gîtes filoniens*

Iles Salomon. N° 1752
Australie. N° 1753
La Sarre (Lorraine). N° 1076
Tinoca (Portugal). N° 1954
Cheida (Tunisie). N° 1955

4° *Gîtes filoniens*

Accous (Basses-Pyrénées). N° 1001

**C-VII. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Estrella (Pr. de Madrid). N° 1613
Chilena (Pr. de Madrid). N° 1613
Providenzia (Pr. de Madrid). N° 1613
Verdad (Pr. de Madrid). N° 1613
Gargantilla (Pr. de Madrid). N° 1613
Burracho (Pr. de Madrid). N° 1613

**C-VIII. — Cuivre**

1° *Gîtes filoniens*

(Californie). N° 1649

2° *Gîtes filoniens*

Cooper queen (Arizona). N° 1777
Duck Town (Tennessee). N° 1559

3° *Gîtes filoniens*

Alleghany (Virginie). N° 1430
Rosario (Rép. Argentine). N° 1754
Catamarca (Rép. Argentine). N° 1754

4° *Gîtes filoniens*

San-Juan (Rép. Argentine). N° 1754
Salta (Rép. Argentine). N° 1754
Rioja (Rép. Argentine). N° 1754
San-Miguel (Rép. Argentine). N° 1754

**C-IX. — Cuivre**

1° *Gîtes filoniens*

Burra-burra (Australie). N° 1956

2° *Amas filoniens*

(Morée) N° 1680

3° *Amas filoniens*

Akthala (Caucase). N° 1786

4° *Amas filoniens*

La Malou (Hérault). N° 1957

**C X. — Cuivre**

1° *Amas filoniens*

Santa-Cecilia (Mexico). N° 1105
Sinaloa (Mexique). N° 1106
Tamazula (Jalisco). N° 1107

2° *Amas filoniens*

La Nelfa (Durango). N° 1108
Santa-Barranca (Sonora). N° 1109
Alfredina (Sonora). N° 1110
Ilucyapan (Puebla). N° 1111

3° *Amas filoniens*

Descugano (Chili). N° 1112
Cabeca-Alta (Portugal). N° 1406
Minaucos (Portugal). N° 1407
Csiklova (Hongrie). N° 1115

4° *Amas filoniens*

Djebel-Herruch (Tunisie). N° 1114
Achaiches (Constantine). N° 1396
La Calle (Constantine). N° 139
Gorges de Rigas (Alger). N° 1398
Ravin de Hadjail (Alger). N° 1399
Soumah, près Blidah (Alger). N° 1400

**C-XI. — Cuivre**

1° *Amas filoniens*

Barrancanès (Séville). N° 1634

2°, 3°, 4° *Amas filoniens*

Rio Tinto (Huelva). N° 1653
Negrita (Sierra Nevada). N° 1401

**C-XII. — Cuivre**

1° *Amas filoniens*

Slovenka (Hongrie). N° 1603



2°, 3°, 4° *Amas filoniens*

Röraas (Norwège). N° 1538

**C-XIII. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Amas filoniens*

Fahlun (Suède). N° 1539

**C-XIV. — Cuivre**

1° *Cuivre gris*

Boujam. N° 1117
Tadergount. N° 1118
Kandirou. N° 1119
Djebel-Talouine. N° 1120
Bled-el-Hammam (Const.). N° 1121
Ghil-oum-Djinn (Const.). N° 1122
Djebel-Bekal (Constantine). N° 1402

2° *Cuivre gris*

Mouzaia (Alger). N° 1124
Beni-Aquil (Alger). N° 1125
Oued-Bounan (Alger). N° 1129
Oued-Allelah (Alger). N° 1126
Sidi-bou-Assi (Alger). N° 1127
Gourraya (Alger). N° 1128
Oued-Sidi-Rhibir (Alger). N° 1403

3° *Cuivre gris*

Coahuila (Mexique). N° 1132
Jalisco (Mexique). N° 1133
Morelos (Mexique). N° 1134

4° *Cuivre gris*

Quintera (Sonora). N° 1135
Rio-Chico (Sonora). N° 1136
Zacatecas (Mexique). N° 1137
Paderm (Aude). N° 1138

**C-XV. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Cuivre gris*

Sierra Nevada (Espagne). N° 1645
Valence (Espagne). N° 1130
Torre de las Siete Esquinas (Espagne). N° 1774

**C-XVI. — Cuivre**

1°, 2°, 3° *Cuivre gris*

Petite Kabylie. N° 1664

4° *Cuivre gris*

(Serbie). N° 1404
Brixleys (Tyrol). N° 1115
Schvatz (Tyrol). N° 1116

**C-XVII. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Cuivre natif*

Lac Supérieur (Michigan). N° 1526

**C-XVIII. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Cuivre natif*

Lac Supérieur (Michigan). N° 1599

**C-XIX. — Cuivre**

1°, 2°, 3° *Cuivre natif*

Lac Supérieur (Michigan). N° 1599

4° *Cuivre natif*

Le Cap. N° 1958

**C-XX. — Cuivre**

1° *Cuivre natif*

El Progreso (Michoacan). N° 1405

2° *Gîtes sédimentaires*

Mansfeld (Saxe). N° 1959

3° *Gîtes sédimentaires*

Rammelsberg (Hanovre). N° 1961

4° *Gîtes sédimentaires*

Schirmeck (Alsace). N° 1139
(Basse-Californie). N° 1140

**C-XXI. — Cuivre**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes sédimentaires*

Boleo (Basse-Californie). N° 1160

VITRINES CENTRALES

**Régions métallifères**

I

Chili. N° 1312
N° 1341
N° 1349
N° 1350

II

Chili. N° 1350
N° 1351

III

Chili N° 1578

TROPHÉES

**I. — Cuivre**

Mensula (Espagne).
Caderles (Gard).

**II. — Cuivre**

Monte-Catini (Toscane).

## Salle D

VITRINES MURALES

### D-I. — Zinc

1° *Amas dans les roches*

Ammeberg (Suède). N° 1548

2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Andreasberg (Hanovre). N° 1738
Zacatecas (Mexique). N° 1639
Nostra Senora (Sinaloa). N° 1638
Pastora (Jalisco). N° 1637
Duc-Bô (Annam) N° 1659
Dong-Trieu (Tonkin). N° 1655
Picos de Europa (Asturies). N° 1213
Picos del Pando (Asturies). N° 1214
Sgudicato (Pyrénées). N° 1026
Gharbou (Constantine). N° 1666
La Voute-Chilhac(Hte-Loire). N° 1710

### D-II. — Zinc

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Laurium (Grèce). N° 1681

### D-III. — Zinc

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Monteponi (Sardaigne). N° 1549

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Iglesias (Sardaigne). N° 1607
Monte-Agruxau (Sardaigne). N° 1968

### D-IV. — Zinc

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Malfidano (Sardaigne). N° 1967

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Djebel Reças (Tunisie). N° 1964
Bou Gournein (Tunisie). N° 1965
Kranguet-el-Tout (Tunisie). N° 1966
Sakamody (Alger). N° 1969

### D-V. — Zinc

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Ouarsenis (Alger). N° 1023

3° *Gîtes filoniens*

Guerrouma (Alger). N° 1027
Djebel-Fillaoucen (Alger). N° 1024
Kalaa-K'bail (Oran). N° 1029
Maazis (Oran). N° 1028
Djebel-Masser (Oran). N° 1031
Djendeli (Constantine). N° 1025
Hamimat-Arks (Const.) N° 1032

4° *Gîtes filoniens*

Aïn-Barbar (Constantine). N° 1022
Hammam-N'bails (Const.). N° 1034
Aïn-Safra (Constantine). N° 1033
(Constantine). N° 1035
Clairac (Gard). N° 1972
St-Julien, près Alais (Gard). N° 1974
Maudesse (Gard). N° 1973

### D-VI. — Zinc

1° *Gîtes filoniens*

Les Malines (Gard). N° 1971

2° *Gîtes filoniens*

Saint-Laurent-le-Minier (Hérault). N° 1631

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Reocin (Asturies). N° 1975

### D-VII. — Zinc

1° *Gîtes filoniens*

Calavera (Guipuzcoa). N° 1976

2°, 3° *Gîtes filoniens*

San-Narciso (Guipuzcoa). N° 1977

4° *Gîtes filoniens*

Linarès (Jaen). N° 1978

### D-VIII. — Zinc

1° *Gîtes filoniens*

Tarnowitz (Silésie). N° 1735



2° *Gîtes filoniens*

Boleslaw (Pologne). N° 1970

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Vieille-Montagne. N° 1565
Moresnet. N° 1565
Welkenraedt. N° 1565

### D-IX. — Plomb et divers

1°, 2°, 3° *Filons complexes*

Bords du Rhin (Prusse rhénane). N° 1699

4° *Filons complexes*

Egri-Aéré (Turquie d'Asie). N° 1736

### D-X. — Plomb et divers

1°, 2°, 3°, 4° *Filons complexes*

Schemnitz (Hongrie). N° 1588

### D-XI. — Plomb et divers

1°, 2°, 3°, 4° *Filons complexes*

Schemnitz (Hongrie). N° 1588

### D-XII. — Plomb et divers

1°, 2° *Filons complexes*

Schemnitz (Hongrie). N° 1588
Arre (Basses-Pyrénées). N° 1540

3° *Filons complexes*

Goldberg (Silésie). N° 1572

4° *Filons complexes*

Bleiberg (Carinthie). N° 1081

### D-XIII. — Plomb et divers

1° *Filons complexes*

Chanarcillo (Chili). N° 1987
Abères (Ariège). N° 1018
Sarre (La) (Lorraine). N° 1076
Eimgheir (Saxe). N° 1408
Dalmatie (Alger). N° 1409

2°, 3°, 4° *Filons complexes*

Vals Trompia et Sussina. N° 1521

### D-XIV. — Plomb et divers

1° *Filons complexes*

Huelgoat (Finistère). N° 1982

2° *Filons complexes*

Poullaouen (Finistère). N° 1983

3°, 4° *Filons complexes*

Pontpean (Ille-et-Vilaine). N° 1674

### D-XV. — Plomb et Divers

1° *Filons complexes*

Vialas (Lozère). N° 1615

2°, 3°, 4° *Filons complexes*

Ghar-el-Kohol (Constant.). N° 1410
Bir-Beni-Salah (Constant.). N° 1036
Dar-el-Hamoud (Const.). N° 1039
Beni-Mimoun (Constant.). N° 1040
Aïn Tebessa (Constantine). N° 1411
Bou Taleb (Constantine). N° 1044
Melousla (Constantine). N° 1041
Cavallo (Constantine). N° 1043
Ouarsenis (Alger). N° 1051
Akroub (Alger). N° 1045
Oued Bordja (Alger). N° 1046
Dalmatie (Alger). N° 1047
Nador Scheir (Alger). N° 1048
Oued Rehan (Alger). N° 1049
Guerrouma (Alger). N° 1141
Sidi Arama (Oran). N° 1052
Coudiat Resas (Oran). N° 1053
Djebel Masser (Oran). N° 1054
Moazis (Oran). N° 1055
Gar Rouban (Oran). N° 1056

### D-XVI. — Plomb et Divers

1° *Filons complexes*

Caderles (Gard). N° 1979
Ferrusac (Hte-Loire). N° 1708
St-Pal-de-Murs (Hte-Loire). N° 1709

2° *Filons complexes*

Dadou (Tarn). N° 1687

3° *Filons complexes*

Durango (Mexique). N° 1057
San Luis de Potosi (Mex.). N° 1058
Sinaloa (Mexique). N° 1059
Zacatecas (Mexique). N° 1060

4° *Filons complexes*

La Baume (Aveyron). N° 1617
Wardner N° 1989

**D-XVII. — Plomb**

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Djebel Reças (Tunisie). N° 1591
Djebel Reças (Tunisie). N° 1985
Kranguet-el-Tout (Tunisie). N° 1061
Djebel Trozza (Tunisie). N° 1062
Djebilet-el-Kohol (Tunisie). N° 1063
Bou Gournein (Tunisie). N° 1064
Djebba (Tunisie). N° 1065

3° *Gîtes filoniens*

Horcajo (Espagne). N° 1654

4° *Gîtes filoniens*

Grand-Clos (Hautes-Alpes). N° 1650

**D-XVIII. — Plomb**

1°, 2°, 3° *Gîtes filoniens*

Sierra de Carthagène (Esp.). N° 1683

4° *Gîtes filoniens*

Union (Sierra de Carthagène). N° 1066

**D-XIX. — Plomb**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Mendoza et Rioja (Rép. Argentine). N° 1986
Llanidloes (South Wales). N° 1412
Frongoch Mine (S.W.). N° 1413
Sestrade (Corrèze). N° 1519
Virginie (États-Unis). N° 1988
Laurium (Grèce). N° 1990
Madrid (Espagne). N° 1608
Aguilas (Andalousie). N° 1992
Sidi Camber (Constantine). N° 1420
El Aminia (Constantine). N° 1419
La Calle (Constantine). N° 1414
Bouzareah (Alger). N° 1415
Pointe Pescade (Alger). N° 1416
Arrouach (Alger). N° 1417
Tazout (Oran). N° 1418
Djebel Masser (Oran). N° 1421

**D-XX. — Plomb**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Zacatecas (Mexique). N° 1067
Sinaloa (Mexique). N° 1068
Durango (Mexique). N° 1069
Jalisco (Mexique). N° 1070
Sonora (Mexique). N° 1071
Puebla (Mexique). N° 1072
Parral (Chihuahua). N° 1073
Coahuila (Mexique). N° 1083
Mexico (Mexique). N° 1082
Morelos (Mexique). N° 1074
San Pedro (Nuevo Leon). N° 1075
Guadalupe (Nuevo Leon). N° 1078
Las Animas (Chihuahua). N° 1795
Santa Barbara (Chihuahua). N° 1796
Berezowsk (Russie). N° 1991
Belmont (Hte-Loire). N° 1698
Meretrix (Nlle-Calédonie). N° 1636
Prades (Hte-Loire). N° 1691
Chausse (Hte-Loire). N° 1707
Tailhac (Hte-Loire). N° 1705

**D-XXI. — Plomb**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes sédimentaires*

Mechernich. N° 1201
Saint-Avold (Lorraine). N° 1215

VITRINES CENTRALES

**Champs de fractures**

I

Saxe. N° 1340

II

Harz (Hanovre). N° 1517

III

Schemnitz (Hongrie). N° 1981

TABLES D'EMBRASURES

**D-t. I. — Antimoine**

La Licoulne (Haute-Loire). N° 1718
Sazty-Deré (Asie-Mineure). N° 1203
Almuradiel (Espagne). N° 1610
Monte-Cavallo (Toscane). N° 1204
Rosia (Toscane). N° 1720
Granagiolo (Corse). N° 1367



Sierra Nevada (États-Unis). N° 1205
Brieser Mauth (Hongrie). N° 1314
Iglo (Hongrie). N° 1202
Sarawak (Bornéo). N° 1511
Le Genest (Mayenne). N° 1206
Ak Koi (Tonkin). N° 1207
Chanac (Corrèze). N° 1208
Monk Hay (Tonkin). N° 1209
Miria (Corse). N° 1210

**D-t. II. — Antimoine**

Nades (Allier). N° 1329
Racles (Puy-de-Dôme). N° 1330
Huelgoat (Finistère). N° 1423
Lubella (Hongrie). N° 1424
Sitio do Tojo (Portugal). N° 1425
Tapada do Padre (Portugal). N° 1426
Aïn Babouch (Constantine). N° 1427
Tebitga (Constantine). N° 1428
Nador (Constantine). N° 1429
Chazelles (Puy-de-Dôme). N° 1432
Su Suergin (Sardaigne). N° 1433
Nieddores Flumines (Sard.). N° 1434
El Gresa (Constantine). N° 1435
Freycenet (Haute-Loire). N° 1652
La Fage (Haute-Loire). N° 1692
Barlet (Haute-Loire). N° 1697
Tailhac (Haute-Loire). N° 1693
Chazelles (Haute-Loire). N° 1688

**D-t. II. — Arsenic**

Sainte-Marie-aux-Mines (Alsace). N° 1257
Bonnac (Cantal). N° 1530

**D-t. III. — Bismuth**

Meymac (Corrèze). N° 1211
Bleka (Norwège). N° 1212
Adélaïde (Australie). N° 1594

**D-t. III. — Vanadium**

Charcas (Mexique). N° 1963

TROPHÉES

**I. — Zinc**

Laurium.
Saint-Laurent-le-Minier.

**II. — Plomb**

Vialas.
Genolhac.

## Salle E

TABLE D'EMBRASURE

**E-t. I. — Mercure**

Almaden (Ciudad Real). N° 1315
Almaden (Ciudad Real). N° 1641
Djebel Maksen (Constant.). N° 1255
Mieres Oviedo (Asturies). N° 1995
Dumbrava (Hongrie). N° 1253
Nakely (Nlle-Calédonie). N° 1102
La Chapelle-en-Juger. N° 1438
Potocnig (Carniole). N° 1677
Littai (Carniole). N° 1318

VITRINE MURALE ISOLÉE

**E-XX. — Mercure**

Idria (Carniole). N° 1079
Idria (Carniole). N° 1080
Idria (Carniole). N° 1665

TABLE D'EMBRASURE

**E-t. II. — Mercure**

Calahora (Sierra Nevada). N° 1644
Ras Elma (Constantine). N° 1994
Sièle (Toscane). N° 1676
(Chili). N° 1316
Djebel Onst (Tunisie). N° 1996
Yamato (Japon). N° 1661
(Mexique). N° 1317
(Chine). N° 1439
Nikitofka (Donetz). N° 1776
New Almaden (Californie). N° 1643
Aïn K'sar (Constantine). N° 1537
Oued Bonghi (Constantine). N° 1440

VITRINES MURALES

**E-I. — Argent**

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Mendoza et Rioja (Rép. Argentine). N° 1754

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Comstock (Nevada). N° 1600
Comstock (Nevada). N° 1647

**E-II. — Argent**

1° *Gîtes filoniens*

Silver King (Arizona). N° 1771
Sala (Suède). N° 1719

2°, 3° *Gîtes filoniens*

Jubilu (États-Unis). N° 1775
Kongsberg (Norwège). N° 1308
Kongsberg (Norwège). N° 1743

4° *Gîtes filoniens*

Motherlode (Californie). N° 1304
Drumlummin (États-Unis). N° 1306
Castle Town (États-Unis). N° 1305
Mollie Gibson (Colorado). N° 1003
Chatanque Mine (Nevada). N° 1007
Daily and Alliance (Utah). N° 1006
Cachis (Utah). N° 1008

**E-III. — Argent**

1° *Gîtes filoniens*

Mammoth Mine (Utah). N° 1009
Bingham (Utah). N° 1646

2°, 3° *Gîtes filoniens*

Georgetown and Carribou. N° 1600
Austin (Nevada). N° 1525

4° *Gîtes filoniens*

Leadville (Colorado). N° 1723

**E-IV. — Argent**

1° *Gîtes filoniens*

Alice Mine (Montana). N° 1770
Veterand (Chili). N° 1999

2° *Gîtes filoniens*

Oruro (Bolivie). N° 1307

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Thames (Nouvelle-Zélande). N° 1997
Ikouno (Japon). N° 1660

**E-V. — Argent**

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Sarrabus (Sardaigne). N° 1582

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Sarrabus (Sardaigne). N° 1658

**E-VI. — Argent**

1°, 2°, 3° *Gîtes filoniens*

Sarrabus (Sardaigne). N° 1658

4° *Gîtes filoniens*

Sarrabus (Sardaigne). N° 1642

**E-VII. — Argent**

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Sarrabus (Sardaigne). N° 1642

3° *Gîtes filoniens*

Rodna (Hongrie). N° 1256

4° *Gîtes filoniens*

Urvolgy (Hongrie). N° 1227

**E-VIII. — Argent**

1° *Gîtes filoniens*

Monte Narba (Sardaigne). N° 1226
Sierra Almagrera (Almeria). N° 1998

2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Mexico (Mexique). N° 1444
Jalisco (Mexique). N° 1443
San Luis de Potosi (Mex.). N° 1449
San Rafael (Durango). N° 1262
La Calaverita (Durango). N° 1251
Oajaca (Mexique). N° 1447
Michoacan (Mexique). N° 1446
Santa Inez (Queretaro). N° 1250
Sonora (Mexique). N° 1507
Tepic (Mexico) (Mexique). N° 1445
Puebla (Mexique). N° 1448
Santa Rosalia (Chihuahua). N° 1249

**E-IX. — Argent**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Zacatecas (Mexique). N° 1641

**E-X. — Argent**

1°, 2° *Gîtes filoniens*

Zacatecas (Mexique). N° 1641



3° *Gîtes filoniens*

Chihuahua (Mexique). N° 1442
Sinaloa (Mexique). N° 1506

4° *Alluvions de* Platine

Nijne Taguil (Russie). N° 1319

**E-XI. — Or**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes divers du Brésil*

Rapazos (Minas Geraes). N° 1762
Passagem (Minas Geraes). N° 1763
Cuiaba (Minas Geraes). N° 1764

**E-XII. — Or**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes divers du Brésil*

Moro Velho (Minas Geraes). N° 1760
Sao Luiz (Minas Geraes). N° 1765
Bon d'Alfié (Minas Geraes). N° 1766
Pacientia (Minas Geraes). N° 1767
Tinoco (Minas Geraes). N° 1768
Vasada (Minas Geraes). N° 1761

**E-XIII. — Or**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes divers du Brésil*

Pary (Minas Geraes). N° 1769
Carapatos (Minas Geraes). N° 1756
Jao Julio d'Ahraranga (Minas Geraes). N° 1759
Barra (Minas Geraes). N° 1757
Sao Bento (Minas Geraes). N° 1755
Maquiné (Minas Geraes). N° 1758

**E-XIV. — Or**

1° *Gîtes divers du Brésil*

Quartz aurifères. N° 1230

2°, 3° *Gîtes filoniens*

El Callao (Venezuela). N° 1651

4° *Gîtes filoniens*

Boulder Conty (Colorado). N° 1235
Highland (Dakota). N° 1773
Alleghany (Virginie). N° 1431
Sheridan Mine (Idaho). N° 1013
Mammoth Mine (Utah). N° 1010
Mayflower Mine (Californie). N° 1011
Cripple Creek (Colorado). N° 1012

**E-XV. — Or**

1° *Gîtes filoniens*

(Californie) N° 1600
Berezowsk (Sibérie). N° 1633

2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Berezowsk (Sibérie). N° 1633

**E-XVI. — Or**

1° *Gîtes filoniens*

Berezowsk (Sibérie). N° 1633

2° *Gîtes filoniens*

Nijné Miask (Monts Ourals). N° 1231
La Gardette (Isère). N° 1232
Lyon (Env. de) (Rhône). N° 1233

3° *Gîtes filoniens*

Cab Tach (Asie-Mineure). N° 1733
Val Troppa (Piémont). N° 1237
Alagna (Piémont). N° 1236

4° *Gîtes filoniens*

Pestarena (Piémont). N° 1238
Gondo (Suisse). N° 1560
Bong-Mieû (Annam). N° 1667

**E-XVII. — Or**

1°, 2°, 3°, 4° *Gîtes filoniens*

Churiniodi (Sinaloa). N° 1244
Colarado del Yaqui (Sonora). N° 1245
Bradshaw (Arizona). N° 1772
Satsuna (Japon). N° 1694
Santo Domingo de la Pena (Chili). N° 1241
Simmon's reef (Australie). N° 1240
K'Thong (Siam). N° 1234
Carlisle (New Mexico). N° 1242
Rescate (Oajaca). N° 1737
Guadalupe (Chihuahua). N° 1243
Sinaloa (Mexique). N° 1441
Pihuamo (Jalisco). N° 1246
Batopilas (Mexique). N° 1247
Nagyag (Transylvanie). N° 1309
Verespatak (Hongrie). N° 1229
Offenbanya (Hongrie). N° 1437
Ayrshire (Mashonaland). N° 1670
Colorado (États-Unis). N° 1310

**E-XVIII. — Or**

1°, 2° *Gîtes filoniens*

(N^lle-Écosse). N° 1554

3°, 4° *Gîtes filoniens*

Eule (Bohême). N° 1696

**E-XIX. — Or**

1° *Gîtes filoniens*

Cunapiru (Uruguay). N° 1249

2°, 3°, 4° *Gîtes sédimentaires*

Rip (Battery reef) (Transvaal). N° 1485
Teutonia Mine (Transvaal). N° 1486
Witpoortje » N° 1487
Odessa » N° 1488
Edinburgh » N° 1489
Langlaagte Estate » N° 1490
Crown reef » N° 1491
Robinson » N° 1492
Ferreira » N° 1493
Wemmer » N° 1494
Village Main reef » N° 1495
Royal (Salisbury Extension) » N° 1496
Metropolitan » N° 1497
May Consolidated » N° 1498
Balmoral (anc^t Gardner) » N° 1499
Ginsberg » N° 1500
Van Ryn » N° 1501
Du Preez reef » N° 1502
Zuurbult reef (Dorn Kop) » N° 1503
Madeline » N° 1504
Droogheuvel » N° 1505

VITRINES CENTRALES

**I. — Mercure. — Argent. — Or**

Côte du Pacifique (É.-U.). N° 1648

**II. — Or**

Witwatersrand (Transvaal) (coupe géologique du). N° 1450
Rip (Transvaal). N° 1451
Durban Roodepoort (Transvaal) N° 1453
United Main Reef Roodepoort » N° 1454
Vogelstruis » N° 1455
New-Crœsus » N° 1457
Langlaagte Royal » N° 1458
Crown deep » N° 1459
Robinson » N° 1460
Ferreira » N° 1461
Wemmer » N° 1462
City and Suburban » N° 1463
Wolhuter » N° 1464
Nourse deep » N° 1465
New Heriot » N° 1466
Jumpers » N° 1467
Rose deep » N° 1469
Geldenhuis » N° 1468
Blinkpoort » N° 1452
Simmer and Jack » N° 1470
Witwatersrand Mine (Knights) » N° 1471
Balmoral » N° 1472
Comet (East rand) » N° 1473
Angelo » N° 1474
Chimes » N° 1475
Van Ryn » N° 1476
Modderfontein » N° 1477
Nigel » N° 1479
Heidelberg » N° 1480
Rietfontein » N° 1478
Orion » N° 1481
Midas » N° 1482
Buffelsdorn » N° 1483

TROPHÉES

**I. — Argent**

Comstock (Nevada).
Buena Esperanza (Chili).

**II. — Or**

Moro Velho (Brésil).
Passagem (Brésil).
Pary (Brésil).

**III. — Mercure**

New Almaden (Etats-Unis).



# NOMENCLATURE

PAR

## PAYS

ET PAR

## SUBSTANCES MINÉRALES

### ALGÉRIE

**Aluminium**

Petite-Kabylie. Bm. XVIII (*)

**Antimoine**

Aïn Babouch (Const.). Dt. II (**)
El Greso (Constantine). Dt. II
Tebitga » Dt. II

**Calcium**

*Pierres lithographiques*

Ravin bleu près Batna. Am. XVI

*Gypse*

Amoura. Am. XVII
Beni Mimoun (Const.). Am. XVII
Beni Saf (Oran). Am. XVII
Bou Thelis » Am. XVII
Christel » Am. XVII
Fleurus » Am. XVII
Harrouch » Am. XVII
Karombo » Am. XVII
Mers-el-Khebir » Am. XVII
Milah (Constantine). Am. XVII
Rovigo (Alger). Am. XVII
Zerouala (Pet.-Kabylie). Am. XVII

*Marbres*

Djebel Chenouah (Alger). Am. XVIII
Djebel Orousse (Oran). Am. XVIII
Filfila (Constantine). Am. XVIII
Sidi-Brahim (Oran). Am. XVIII

*Onyx*

Aïn Sba (Oran). Am. XVIII
Djebel Taffat (Const.). Am. XVIII
Tekbalet (Oran). Am. XVIII

**Carbone**

*Bitume*

Aïn Zeft-Dahra (Oran). Am. VI

**Chrome**

Euch-el-Bez (Const.). Bm. IX

**Cuivre**

*Pyrites de Cuivre*

Abla (Oran). Cm. IV
Achaiches (Constantine). Cm. X
Aïn Barbar (Const.). Cm. IV
Beni Mimoun » Cm. IV
Cap Tenez (Alger). Cm. IV
Cheraia (Constantine). Cm. IV
Djebel Hadid (Alger). Cm. IV
Gorges de Rigas (Alger). Cm. X
Kef-oum-Teboul (Const.). Cm. IV
La Calle (Constantine). Cm. X
Mouzaia (Alger). Cm. IV
Oued Allelah (Alger). Cm. IV
Oued bou Allou » Cm. IV
Oued Kebir » Cm. IV
Oued K'Seul (Oran). Cm. IV
Oued Melah (Alger). Cm. IV
Oued Merdja » Cm. IV
Ravin du Hadjail » Cm. X
Soumah » Cm. X

(*) Bm. XVIII signifie Salle B, vitrine murale XVIII. (Se reporter pour trouver le numéro de la collection à la nomenclature précédente par ordre de classement.)

(**) Dt. II signifie Salle D, table d'embrasure II.

*Cuivres gris*

Beni Aquil (Alger). Cm. XIV
Bled-El-Hammam (Constantine). Cm. XIV
Boujam (Constantine). Cm. XIV
Djebel Bekal (Const.). Cm. XIV
Djebel Talouine (Const.). Cm. XIV
Ghil-oum-Djinn (Const.). Cm. XIV
Gourraya (Alger). Cm. XIV
Kaudirou (Constantine). Cm. XIV
Mouzaïa (Alger). Cm. XIV
Oued Allelah » Cm. XIV
Oued Bounan » Cm. XIV
Oued Sidi Rhibir » Cm. XIV
Sidi-bou-Aissi. » Cm. XIV
Tadergount (Constant.). Cm. XIV
(Petite-Kabylie). Cm. XVI

**Fer**

Aïn Oudrer (Alger). Bm. XI
Aïn Sadouna » Bm. XVI
Aïn Sedma (Const.). Bm. I
Bab M'Teurba (Oran). Bm. XIV
Beni Mimoun (Const.). Bm. XI
Beni Aquil (Alger). Bm. XVI
Beni Saf (Oran). Bm. XIV
Bouïnan (Alger). Bm. XVI
Camerata (Oran). Bm. XI
Cap Tenez (Alger). Bm. XVI
Chabet Queraï. Bm. XI
Djebel Hadid (Alger). Bm. XVI
Djebel Temoulga (Alger). Bm. XV
Douar Medjadja. Bm. XI
Gouraya (Oran). Bm. XVI
Kandirou (Constantine). Bm. XV
Larrhat (Alger). Bm. XVI
Meboudga (Constantine). Bm. I
Messelmoun » Bm. XVI
Mokta-el-Hadid (Const.). Bm. XII
Maouaria (Constantine). Bm. XI
M'rabdine (Alger). Bm. XI
Ouarsenis (Alger). Bm. XV
Oued Djer » Bm. XVI
Oued Rouina » Bm. XV
Ouled Nouar (Const.). Bm. XI
Sidi Saf (Oran). Bm. XV
Sidi Sliman (Alger). Bm. XV
Soumah » Bm. XVI
Tazout (Oran). Bm. XV
Yeffi » Bm. XVI
Zaccar Rharba (Alger). Bm. XV

**Fluor**

Gar Rouban (Oran). Am. III

**Magnésium**

Aïn Sedma (Constantine). Am. XIV
Beni Saïd (Constantine) Am. XIV

**Manganèse**

Azib Zamoun (Alger). Bt. I
Bouzarea (Alger). Bt. I
La Couraya (Const). Bt. I
Voile Noiro (Const.). Bt. I

**Mercure**

Aïn K'Sar (Constantine). Et. I
Oued Boughi (Constantine). Et. II
Ras-Elma (Constantine). Et. II
Tyghit-Saygta » Et. I

**Phosphore**

Djebel Tadjera. Am. XII
Djebel Toumaï. Am. XI
Inkermann. Am. XII
Souk Ahras. Am. XII

**Plomb**

Arrouach (Alger). Dm. XIX
Bouzareah. » Dm. XIX
Djebel Masser (Oran). Dm. XIX
La Calle (Constantine). Dm. XIX
El Aminia » Dm. XIX
Pointe Pescade (Alger). Dm. XIX
Sidi Camber (Const.). Dm. XIX
Tazout (Oran). Dm. XIX

**Plomb et Divers**

Aïn Abessa (Const.). Dm. XV
Akroub (Alger). Dm. XV
Beni Mimoun (Const.). Dm. XV
Bir Beni Salah (Const.). Dm. XV
Bou Taleb (Constantine). Dm. XV
Cavallo » Dm. XV
Coudiat Resas (Oran). Dm. XV
Dalmatie (Alger). Dm. X
Dar-el-Hamoud (Const.). Dm. XV
Djebel Masser (Oran). Dm. XV
Gar Rouban » Dm. XV
Gar-el-Kohol (Const.). Dm. XV
Guerrouma (Alger). Dm. XV
Maazis (Oran). Dm. XV
Melousla (Constantine). Dm. XV
Nador Sheir (Alger). Dm. XV
Ouarsenis » Dm. XV
Oued Bordja » Dm. XV
Oued Rehan » Dm. XX
Sidi Arama (Oran). Dm. XV

**Sodium**

Djebel Sanari. Am. XIV
Milah (Constantine). Am. XIII
El Outaya » Am. XIII
Ouled Khebed. » Am. XIII

**Zinc**

Aïn Barbar (Constantine). Dm. V
Aïn Safra » Dm. V
Gharbou » Dm. I
Djebel Fillaoucen (Oran). Dm. V
Djebel Masser » Dm. V
Djendeli (Constantine), Dm. V
Guerrouma (Alger). Dm. V
Hamman N'bails (Const.). Dm. V
Hamimat Arks (Const.) Dm. V
Kalaa K'bail (Oran). Dm. V
Maazis » Dm. V
Ouarsenis (Alger). Dm. V
Sakamody » Dm. IV
Constantine. Dm. V

---

## ALLEMAGNE

**Aluminium**

Sarreguemines (Lorr.). Bm. XVIII

**Arsenic**

Sainte-Marie-aux-Mines (Alsace). Dt. II

**Calcium**

*Pierres lithographiques*

Solenhofen (Bavière). Am. XVI

**Carbone**

*Ambre*

Samland (Prusse). Am. V

**Cobalt**

Schneeberg (Saxe). Bt. II

**Cuivre**

La Sarre (Lorraine). Cm. VI
Mansfeld (Saxe). Cm. XX
Rammelsberg (Hanovre.) Cm. XX
Schirmeck (Alsace). Cm. XX

**Étain**

Altenberg (Saxe). Ct. II

**Fer**

La Sarre (Lorraine). Bm. XIII
Neunkirchen (Prusse rhénane). Bm. XIII
Tarnowitz (Silésie). Bm. XIV
Silésie. Bm. V

**Manganèse**

La Sarre (Lorraine). Bt. I

**Phosphore**

Eckholshausen (Nassau). Am. XI

**Potassium**

Stassfurt (Anhalt). Am. XIII

**Plomb**

Mechernich (Eifel). Dm. XXI
Saint-Avold (Lorraine). Dm. XXI

**Plomb et Divers**

Bords du Rhin (Prusse rhénane). Dm. IX
Eimgheir (Saxe). Dm. XIII
Goldberg (Silésie). Dm. XII
La Sarre (Lorraine). Dm. XIII
Le Harz (Hanovre). Dc. II
Saxe (Freyberg, etc.). Dc. I

**Strontium**

*Strontianite*

Ahlen (Westphalie). Am. XIV

**Zinc**

Andreasberg (Hanovre). Dm. I
Tarnowitz (Silésie). Dm. VIII

## ANNAM

### Or

Bong-Mieû (Quan-Nahm). Em. XVI

### Zinc

Duc-Bô (Quan-Nahm). Dm. I

---

## ANTILLES

*Curaçao*

### Phosphore

Am. XII

### Phosphore

Navassa. Am. XII

---

## ARGENTINE (République)

### Argent

Mendoza et Rioja. Em. I

### Cuivre

Rosario, Catamarca, San Juan, etc. Cm. VIII

### Manganèse

San Luiz. Bt. I

### Plomb

Mendoza et Rioja. Dm. XIX

---

## AUSTRALIE

### Bismuth

Adelaïde. Dt. III

### Cuivre

Burra-burra. Cm. IX

### Or

Gympie (Queensland). Em. XVII
Simmon's reef. Em. XVII

---

## AUTRICHE

### Aluminium

*Argiles réfractaires*

(Bohême). Bm. XVIII

### Calcium

*Pierres à ciment*

Trifail (Styrie). Am. XVI

*Gypses*

Echternach. Am. XVII
Leogang (Salzbourg). Am. XVII

### Carbone

*Graphite*

Krummau (Bohême). Am. V

*Lignite*

Ellnbogen. Am. V

*Pétrole*

Boryslaw (Galicie). Am. V

*Ozocérite*

Boryslaw Galicie). Am. V

### Cuivre

Brixleys (Tyrol). Cm. XVI
Leogang (Salzbourg). Cm. V
Svatz (Tyrol). Cm. XVI

### Fer

(Croatie). Bm. V

### Mercure

Idria (Carniole). Em. XX
Idria » Em. XX
Idria » Em. XX
Littai » Et. I
Potocnig » Et. I

### Or

Eule (Bohême). Em. XVIII

### Plomb et Divers

Bleiberg (Carinthie). Dm. XII

### Sodium

*Sel gemme*

Berchtesgaden (Tyrol). Am. XIII

### Soufre

Swordrowitz (Galicie). Am. II

---

## BELGIQUE

### Baryum

*Baryline*

Fleurus. Am. XIV



### Phosphore

Ciply (Hainaut). Am. XI

### Zinc

Vieille-Montagne (Moresnet). Dm. VIII

---

## BOLIVIE

### Argent

Cerro del Pasco. Em. II
Oruro. Em. IV

### Cuivre

Cm. V
Cm. V

### Étain

Chorulque (Chuchas). Ct. II
Oruro. Ct. II

---

## BRÉSIL

### Carbone

*Diamant*

Diamantina (Minas Geraes). Am. III
Bahia (Bahia). Am. III
Salobro (Bahia). Am. IV

### Fer

Bm. XII

### Or

Barra (Minas Geraes). Em. XIII
Bᵒⁿ d'Alfié » Em. XII
Carapatos » Em XIII
Cuiaba » Em. XI
Joao Julio d'Ahrarenga (Minas Geraes) Em. XIII
Maquiné (Minas Geraes). Em. XIII
Moro Velho » Em. XII
Pacientia » Em. XII
Pary » Em. XIII
Passagem » Em. XI
Rapazos » Em. XI
Sao Bento » Em. XIII
Sao Luiz » Em. XII
Tinoco » Em. XII
Vasada » Em. XII
Alluvions Em. XIV

## CAMBODGE

### Calcium

*Marbres*

Pursatt. Am. XVIII

---

## CANADA

### Cuivre

Acton. Cm. V

### Phosphore

*Apatite*

Buckingham (Québec). Am. IX

---

## CAP (Le)

### Carbone

*Diamant*

Kimberley. Am. IV
Kimberley (Mine). Am. IV

### Cuivre

Cm. XIX

---

## CHILI

### Argent

Veterand. Em. IV

### Bore

Am. III

### Calcium

*Gypse*

Copiapo. Am. XVII

### Cobalt

El Binta (Coquimbo). Bt. II

### Cuivre

Descugano (Bacuto). Cm. X
Tamaya Cm. VI

### Fer

Bm. V

### Mercure

Et. II

### Or

S. Domingo de la Pena. Em. XVII

### Plomb

Charnacillo. Dm. XIII

## CHINE

### Fer

Bm. VI

### Mercure

Et. II

---

## ESPAGNE

### Aluminium

*Argiles réfractaires*

Biso. Bm. XVIII

### Antimoine

Almuradiel (Ciudad Real) Dt. I

### Argent

Sierra Almagrera (Almeria). Em. VIII

### Cuivre

*Chalcopyrite*

Barrancanès (Andalousie). Cm. XI
Estrella, etc. (Madrid). Cm. VII
Negrita (Sierra Morena). Cm. XI
Rio Tinto (Huelva). Cm. XI
Tulède (N^lle-Castille). Cm. V.
Xérès-Lanteira (Andalousie). Cm. V.

*Cuivre gris*

Sierra Nevada (Grenade). Cm. XV
Torre de las Siete Esquinas (Andalousie). Cm. XV
(Valence). Cm. XV

### Étain

Pentes (Galice). Ct. III
Penuta (Galice). Ct. II
San Manuel (Galice). Ct. II

### Fer

Somorrostro (Biscaye). Bm. XVI

### Mercure

Almaden (Ciudad Real). Et. I
Calahora (Grenade). Et. I
Mières-Oviedo (Asturies). Et. II

### Phosphore

*Phosphorites*

Belmez. Am. X
Cacerès (Cacerès). Am. X
Logrosan (Estramadure). Am. X
Penaflor. Am. X

### Plomb

Aquilas (Andalousie). Dm. XIX
Horcajo (Ciudad Real). Dm. XVII
Mensula. Dm. II
Sierra de Carthagène (Murcie). Dm. XVIII
Union (Murcie). Dm. XVIII
(Madrid). Dm. XIX

### Sodium

*Glaubérite*

Cienpozuelos. Am. XIV

### Zinc

Calavera (Guipuzcoa). Dm. VII
Linarès (Jaen). Dm. VII
Picos de Europa (Astur.) Dm. I
Picos del Pando (Astur.). Dm. I
Reocin (Asturies). Dm. VI
San Narciso (Guipuzcoa). Dm. VII

---

## ÉTAT LIBRE D'ORANGE

### Carbone

*Diamant*

Jagers and Coffee Fontein. Am. IV

---

## ÉTATS-UNIS

### Aluminium

*Kaolins*

Bm. XVIII

### Antimoine

Sierra Nevada. Dt. I

### Argent

Alice Mine (Montana). Em. IV
Austin (Nevada). Em. III
Bingham (Utah). Em. III
Cachis (Utah). Em. II



Castletown. Em. II
Chatanque Mine (Nev.). Em. II
Comstock (Nevada). Em. I
Comstock (Nevada). Em. I
Daily and Alliance (Utah). Em. II
Drumlummin. Em. II
Georgetown and Carriboll (Colorado). Em. III
Jubilu. Em. II
Leadville (Colorado). Em. III
Mammoth Mine (Utah). Em. III
Mollie Gibson (Colorado). Em. II
Motherlode (Californie). Em. II
Silver King (Arizona). Em. II

### Bore

Columbus (Californie). Am. III
San-Francisco (Calif.). Am. III

### Calcium

*Pierres à ciments*

Balcony-Falls (Virginie). Am. XVI

### Carbone

*Graphite*

Raleigh (Caroline du N.). Am. V
Sonoma County (Calif.). Am. VI
Tuolumne County (Calif.) Am. V

*Bitumes*

Buena-Vista (Californie). Am. VI
Sandstone » Am. VI
Sandstone » Am. VI

*Cannel Coal*

Albert-Mine (New Brunswick). Am. VI

*Boghead*

Makarka (Iowa). Am. VI

### Chrome

Baltimore. Bm. IX
Shasta (Californie). Bm. IX

### Cuivre

Alleghany (Virginie). Cm. VIII
(Californie). Cm. VIII
Cooper-Queen (Arizona). Cm. VIII
Ducktown (Tennessee). Cm. VIII
Lac Supérieur (Michigan). Cm. XVII
Lac Supérieur (Michigan). Cm. XVIII
Lac Supérieur » Cm. XIX

### Fer

Devil's head Mountain (Colorado). Bm. XI
Lac Champlain (New-York). Bm. X
Lac Supérieur (Michigan). Bm. XII
Lac Supérieur » Bm. XII

### Mercure

New-Almaden (Calif.). Et. II

### Or

Alleghany (Virginie). Em. XIV
Boulder County (Color.). Em. XIV
Bradshaw (Arizona). Em. XVII
(Californie). Em. XV
Carlisle (New-Mexico). Em. XVII
(Colorado). Em. XVII
Cripple-Creek (Colorado). Em. XIV
Mammoth-Mine (Utah). Em. XIV
Mayflower-Mine (Calif.). Em. XIV
Highland (Dakota). Em. XIV
Sheridan-Mine (Idaho). Em. XIV

### Or. — Mercure. — Argent

Côte du Pacifique (Calif.). Ec. I

### Phosphore

*Phosphates de chaux*

Charlestown (Caroline du Sud). Am. XII
Floride. Am. XII

### Plomb

Bunker and Sullivan (Idaho). Dm. XVI
(Virginie). Dm. XIX

### Silicium

*Ardoises*

Buckingham. Am. VIII
Piscataquis. Am. VIII

### Titane

Dear-Park (Maryland). Bm. IX
Rocks-Springs (Maryl.). Bm. IX

---

## FRANCE

### Aluminium

*Kaolins*

Saint-Yrieix (Hte-Vienne). Bm. XVIII

*Argiles réfractaires*

Le Teil (Ardèche). Bm. XVIII

*Bauxites*

Les Baux (Bhes-du-Rh.). Bm. XVIII
Morre (Hérault). Bm. XVIII
Villevayrac (Hérault). Bm. XVIII

### Antimoine

Barlet (Haute-Loire). Dt. II
Chanac (Corrèze). Dt. I
Chazelles (Haute-Loire). Dt. II
Chazelles (Puy-de-Dôme) Dt. II
Freycenet (Haute-Loire). Dt. II
Granagiolo (Corse). Dt. I
Huelgoat (Finistère). Dt. II
La Licoulne (Hte-Loire). Dt. I
La Fage (Haute-Loire). Dt. II
Le Genest (Mayenne). Dt. I
Miria-Cap Corse (Corse). Dt. I
Nades (Allier). Dt. II
Racles (Puy-de-Dôme). Dt. II
Tailhac (Haute-Loire). Dt. II

### Arsenic

Bonnac (Cantal). Dt. II

### Baryum

La Malou (Hérault). Am. XIV

### Bismuth

Meymac (Corrèze). Dt. III

### Calcium

*Pierres à bâtir*

Divers. Am. XV

*Pierres à chaux*

Les Moulineaux (Seine). Am. XVI

*Pierres à ciment*

Corbigny (Nièvre). Am. XVI
St-Victor-la Coste (Gard). Am. XVI

*Craie*

Meudon (Seine). Am. XVI

*Pierres lithographiques*

Bancs-Rouges (Gard). Am. XVI

*Aragonite*

Dannemarie (Eure-et-L.). Am. XVI

*Gypse*

Palaiseau (S.-et-O.). Am. XVII
Villebon (Seine-et-Oise). Am. XVII
Yvette (Vallée de l') (Seine-et-Oise). Am. XVII

*Marbres*

Aureilles (Bhes-du-Rh.). Am. XVIII
Castera-Vertujan (Drôme) Am. XVIII
Labarthe. Am. XVIII
Saint-Béat (Hte-Garonne). Am. XVIII
Vallée d'Ossau (Bses-Pyr.). Am. XVIII
Villapourçon (Nièvre). Am. XVIII

### Carbone

*Bitumes*

Pont-du-Château (Puy-de-Dôme). Am. VI
Seyssel-Belley (Ain). Am. VII

*Schistes bitumineux*

Autun (Saône-et-Loire). Am. VII
Bois d'Asson (Bses-Alpes). Am. VI
Buxière-la-Grue (Allier). Am. VII
Menat (Puy-de-Dôme). Am. VII

### Chrome

Les Ecouchets (S.-et-L.). Bm. IX

### Cobalt

Allemont (Isère). Bt. II

### Cuivre

Accous (Bses-Pyrénées). Cm. VI
La Malou (Hérault). Cm. IX
Paderm (Aude). Cm. XIV
Ponte-alla-Lecchia (Corse). Cm. II
Prugne (La) (Allier). Cm. II

### Étain

Montebras (Creuse). Ct. II



Penestin (Morbihan). Ct. III
Piriac (Loire-Inférieure). Ct. III
Vaulry (Haute-Vienne). Ct. III
Villeder (Morbihan). Ct. II

### Fer

Ainhoa (Bses-Pyrénées). Bm. VI
Allevard (Isère). Bm. VI
Argut (Hte-Garonne). Bm. VI
Aubin (Aveyron). Bm. XIII
Bezenet (Allier). Bm. XIII
Bordezac (Gard). Bm. XIV
Briey (Meurthe-et-Mos.). Bm. XIV
Chalindrey (Hte-Saône). Bm. XV
Château-Verdun (Ariège). Bm. VII
Chavigny (Mthe-et-Mos.). Bm. XV
Diélette (Manche). Bm. XII et XIII
Exincourt (Doubs). Bm. XVI
Fillols (Pyr.-Orient.). Bm. VIII
Fins. Bm. XIII
Flogny (Yonne). Bm. XVI
Framont (Vosges). Bm. XI
Fumel (Tarn). Bm. XIV
Gimouille (Nièvre). Bm. XV
Hayange (Mthe-et-Mos.). Bm. XV
Izenay (Nièvre). Bm. XV
Latour-Batère (Pyr.-Or.). Bm. VI
Lavoulte (Ardèche). Bm. XV
Mazenay (S.-et-Loire). Bm. XV
Merzelet (Ardèche). Bm. XIV
Mondalazac (Aveyron). Bm. XV
Monts-en-Ternois (Pas-de-Calais). Bm. XVI
Ougney (Jura). Bm. XV
Portes (Gard). Bm. XIII
Pourain (Yonne). Bm. XVI
Prades (Pyr.-Orientales). Bm. VIII
Privas (Ardèche). Bm. XV
Rancié (Ariège). Bm. VII
Rivernert (Ariège). Bm. VI
Saligny (Allier). Bm. XIV
Saint-Eloy (Allier). Bm. XIII
Saint-Florent (Cher). Bm. XVI
St-Pancré (Mthe-et-Mos.). Bm. XV
Saint-Priest (Ardèche). Bm. XV
Saumane (Gard). Bm. XI
Segré (Maine-et-Loire). Bm. XII
Thostes et Beauregard (Côte-d'Or). Bm. XIV
Vassy (Haute-Marne). Bm. XV
Vaussujean (Creuse). Bm. XI
Veyras (Ardèche). Bm. XV

### Fluor

Langeac (Haute-Loire). Am. III
Marsanges (Hte-Loire). Am. III
Gde Vernissière (Gard). Am. III
Urson (Puy-de-Dôme). Am. III

### Manganèse

Aderville (Htes-Pyrénées). Bt. I
Argut (Haute-Garonne). Bt. I
Las Cabesses (Ariège). Bt. I
Mayet-en-Montagne (Allier). Bt. I
Rimont (Ariège). Bt. I
Romanèche (S.-et-Loire). Bt. I
Saint-Quentin (Aisne). Bt. I

### Mercure

La Chapelle-en-Juger. Et. I

### Nickel

Les Challanches (Isère). Bt. II

### Or

La Gardette (Isère). Em. XVI
Lyon (Env. de) (Rhône). Em. XVI

### Phosphore

*Phosphorites*

Quercy (Lot et Tarn-et-Garonne). Am. X

*Phosphates de chaux*

Beauval (Pas de-Calais). Am. XI
Cuchevilliers (Somme). Am. XI
Gourbesville et Orglandes (Manche). Am. XII
Grandpré (Ardennes). Am. XI
Hardivilliers (Oise). Am. XI
Lirac et Tavel. Am. XI
Montigny-sur-Armançon (Côte-d'Or). Am. XI
Quissac (Gard). Am. XI

**Plomb**

Belmont (Haute-Loire). Dm. XX
Chausse (Haute-Loire). Dm. XX
Genolhac. Dt. II
Grand-Clos (Htes-Alpes). Dm. XVII
Huelgoat (Finistère). Dm. XIV
Poullaouen (Finistère). Dm. XIV
Prades (Haute-Loire). Dm. XX
Seştrade (Corrèze). Dm. XIX
Tailhac (Haute-Loire). Dm. XX
Vialas (Lozère). Dm. XV

**Plomb et Divers**

Abères (Ariège). Dm. XIII
Arre (Basses-Pyrénées). Dm. XII
Baume près Villefranche (La) (Aveyron). Dm. XVI
Caderles (Gard). Dm. XVI
Dadou (Tarn). Dm. XVI
Ferrusac (Haute-Loire). Dm. XVI
Pontpéan (Ille-et-Vil.). Dm. XIV
St-Pal-des-Murs (Haute-Loire). Dm. XVI

**Silicium**

*Tripoli*

Marsanne (Drôme). Am. VIII
Menat (Puy-de-Dôme). Am. VIII

*Granite*

(Vosges). Am. VIII
Dielette et Flamanville (Manche). Am. VIII

*Amiante*

Mont-du-Lys (Hte-Gar.). Am. VIII
Pietra Mala (Corse). Am. VIII

*Pierres à aiguiser*

Caen(env. de)(Calvados). Am. VIII

*Talc*

La Garde (Isère). Am. VIII
La Voute Chilhac (Haute-Loire). Am. VIII

**Soufre**

Bagnères-de-Luchon (Htes-Pyrénées). Am. II
Mayet - en - Montagne (Allier). Am. III
Saint-Bel (Rhône). Am. III
Saignon (Vaucluse). Am. II
Saint-Béat (Hte-Garonne). Am. II
Saint-Martin de Renacas (Basses-Alpes). Am. II
Tapet près Apts (Vaucl.). Am. II

**Strontium**

*Célestine*

Condorcet. Am. XIV
Vigan (Gard). Am. XIV
(Gard). Am. XIV

**Tungstène**

Bonnac (Corrèze). Bm. IX
Meymac (Corrèze). Bm. IX
Puy-les-Vignes (Hte-V.). Bm. IX
Vaulry (Haute-Vienne). Bm. IX

**Uranium**

Montcenis (S.-et-Loire). Bm. IX

**Zinc**

Clairac (Gard). Dm. V
La Voute-Chilhac (Haute-Loire). Dm. I
Les Malines (Gard). Dm. VI
Maudesse (Gard). Dm. V
Saint-Julien près Alais (Gard). Dm. V
Saint-Laurent-le-Minier (Gard). Dm. VI
Sgudicato. Dm. I

---

## GRANDE-BRETAGNE

**Calcium**

*Craie*

Sandgate (Sussex). Am. XVI

**Carbone**

*Boghead*

Bathevale (Ecosse). Am. VI

**Étain**

Dolcoath (Cornwall). Ct. I
Mellenaer (Cornwall). Ct. I
Carn Brea,etc.(Cornwall). Ct. I



**Fer**

Parkside (Cumberland). Bm. XIII

**Fluor**

(Derbyshire). Am. III
(Nottinghamshire). Am. III

**Plomb**

Frongoch Mine (South-Wales). Dm. XIX
Llanidloes(South Wales) Dm. XIX

**Tungstène**

East Pool (Cornwall). Bm. IX

---

## GRÈCE

**Aluminium**

*Emeri*

Naxos Bm. XVIII

**Chrome**

Skyros Bm. IX

**Cuivre**

Morée. Cm. IX

**Fer**

Seriphos. Bm XII

**Magnésium**

*Giobertite*

Mandoudi (Ile d'Eubée). Am. XIV

*Magnésite*

(Corinthe). Am. XIV

**Plomb**

Laurium. Dm. XIX

**Zinc**

Laurium. Dm. II
Laurium. Dtr. I
Laurium Bc. II

---

## GROENLAND

**Aluminium**

*Cryolithe*

Evigtok. Bm. XVIII

**Carbone**

*Graphite*

Amenak. Am. V
Julianshaab. Am. V
Rifkoh. Am V

*Jayet*

Suderœ. Am V

---

## HONGRIE

**Aluminium**

*Alumite*

Bereghszasy. Bm. XVIII

**Antimoine**

Brieser Maulh. Dt. I
Iglo. Dt. I
Lubella. Dt. II

**Argent**

Rodna. Em. VII
Urvolgy. Em. VII

**Calcium**

*Gypses*

Iglo. Am. XVII

*Marbres*

(Transylvanie). Am. XVIII

**Cobalt**

Dobschau. Bt. II

**Cuivre**

Csiklova. Cm. X
Gollnitz. Cm. III
Slovenka. Cm. XII

**Fer**

Brasso. Bm. III
Dobschau. Bm. VI
Kotterbach. Bm. III
Libethbanya. Bm. III
Marmaros Sziget. Bm. II
Moravicza. Bm. II
Rohnicz. Bm. III
Rimamurany. Bm. III
Tiszolez. Bm. II

**Mercure**

Dumbrava. Et. I

**Or**

Nagyag. Em. XVII
Offenbanya. Em. XVII
Verespatak. Em. XVII

**Plomb et Divers**

| | |
|---|---|
| Schemnitz. | Dm. X |
| Schemnitz. | Dm. XI |
| Schemnitz. | Dm. XII |
| Schemnitz (Champ de fractures). | Dc. III |

**Silicium**

*Mica*

| | |
|---|---|
| Tajova. | Am. VIII |

**Sodium**

*Sel gemme*

| | |
|---|---|
| Maros Ujvar. | Am. XIII |
| Ronaszet. | Am. XIII |
| Solgatayan. | Am. XIII |
| | Am. XIII |

---

## INDE

*Chrome*

| | |
|---|---|
| | Bm. IX |

---

## ITALIE

**Aluminium**

*Alumite*

| | |
|---|---|
| La Tolfa (Rome). | Bm. XVIII |

**Antimoine**

| | |
|---|---|
| Monte-Cavallo(Toscane). | Dt. I |
| Niedores Flumines (Sardaigne). | Dt. II |
| Rosia (Toscane). | Dt. I |
| Su Suergin (Sardaigne). | Dt. II |

**Argent**

| | |
|---|---|
| Monte-Narba (Toscane). | Em. VIII |
| Sarrabus (Sardaigne). | Em. V |
| Sarrabus » | Em. V |
| Sarrabus » | Em. VI |
| Sarrabus » | Em. VI |
| Sarrabus » | Em. VII |

**Carbone**

*Asphalte*

| | |
|---|---|
| Letto Manopello(Abbr.). | Am. VII |
| Val Romano(Abruzzes). | Am. VII |

*Ozocérite*

| | |
|---|---|
| | Am. V |

**Cobalt**

| | |
|---|---|
| Usseglio (Piémont). | Bt. II |

**Cuivre**

| | |
|---|---|
| Boccheggiano (Toscane). | Cm. II |
| Monte Catini » | Cm. I |
| Monte Catini » | Cm. II |
| Rocca Tederighi » | Cm. II |
| Terricio (Toscane). | Cm. II |

**Étain**

| | |
|---|---|
| Campiglia (Toscane). | Ct. III |

**Fer**

| | |
|---|---|
| Calamita (Ile d'Elbe). | Bm. XVII |
| Traverselle (Piémont). | Bm. III |
| Traverselle » | Bm. III |
| Traverselle » | Bm. IV |
| Traverselle » | Bm. IV |

**Manganèse**

| | |
|---|---|
| Capo Rosso (Sardaigne). | Bt. I |

**Mercure**

| | |
|---|---|
| Siele (Toscane). | Et. II |

**Or**

| | |
|---|---|
| Alagna (Piémont). | Em. XVI |
| Pestarena » | Em. XVI |
| Val Troppa » | Em. XVI |

**Plomb et Divers**

| | |
|---|---|
| Vals Trompia et Susina (Lombardie). | Dm. XVI |

**Sodium**

*Sel marin*

| | |
|---|---|
| Pampinello (Sicile). | Am. XIV |

**Soufre**

*Solfares*

| | |
|---|---|
| Pampinello (Sicile). | Am. II |
| San Cataldo Sicile). | Am. II |
| Villarosa (Sicile). | Am. II |

*Solfatares*

| | |
|---|---|
| Lac Bolzano (Rome). | Am. II |



| | |
|---|---|
| Naples. | Am. II |
| Palerme (Sicile). | Am. II |

**Strontium**

*Célestine*

| | |
|---|---|
| Palerme (Sicile). | Am. XIV |

**Zinc**

| | |
|---|---|
| Iglesias (Sardaigne). | Dm. III |
| Malfidano (Sardaigne). | Dm. IV |
| Monte Agruxau (Sardaigne). | Dm. III |
| Monteponi (Sardaigne). | Dm. III |

---

## JAPON

**Argent**

| | |
|---|---|
| Ikouno (Tajima). | Em. IV |

**Calcium**

*Marbre*

| | |
|---|---|
| Akiyoshi. | Am. XVIII |

**Cuivre**

| | |
|---|---|
| Adakae. | Cm. V |
| Kanagassi | Cm. V |
| Sassagatani. | Cm.V |

**Étain**

| | |
|---|---|
| Minasaka. | Ct. III |

**Mercure**

| | |
|---|---|
| Yamato (Hirado). | Et. II |

**Nickel**

| | |
|---|---|
| Owari. | Bt. II |

**Or**

| | |
|---|---|
| Satsuma. | Em. XVII |

---

## MALAISIE

**Antimoine**

| | |
|---|---|
| Sarawack (Bornéo). | Dt. I |

**Cuivre**

| | |
|---|---|
| Côte occidale (Sumatra). | Cm. V |

**Étain**

| | |
|---|---|
| Bangka. | Ct. III |
| Billiton. | Ct. III |
| Cleydang (Perak). | Ct. III |
| Guntang (Perak). | Ct. III |
| Perak » | Ct. III |
| Petaï » | Ct. III |
| Puloh Brani » | Ct. III |

---

## MASHONALAND

**Or**

| | |
|---|---|
| Ayrshire (La Magondi). | Em. XVII |

---

## MEXIQUE

**Argent**

| | |
|---|---|
| Santa Rosalia (Chilhuahua). | Em. X |
| La Calaverita (Durango). | Em. VIII |
| San Rafael Penoles (Durango). | Em. VIII |
| (Jalisco). | Em. VIII |
| (Mexico). | Em. VIII |
| Tepic (Mexico). | Em. VIII |
| (Michoacan). | Em. VIII |
| (Oajaca). | Em. VIII |
| (Puebla). | Em. VIII |
| Santa Inez (Queretaro). | Em. VIII |
| (San Luis de Potosi). | Em. VIII |
| (Sinaloa). | Em. X |
| (Sonora). | Em. VIII |
| (Zacatecas). | Em. IX |
| (Zacatecas). | Em. X |

**Calcium**

*Gypses*

| | |
|---|---|
| Huchuctlan (Puebla). | Am. XVII |
| Xicotlan (Puebla). | Am. XVII |
| (Zacatecas). | Am. XVII |

*Marbres*

| | |
|---|---|
| Posa del Norte (Chihuahua). | Am. XVIII |

**Cuivre**

| | |
|---|---|
| Boleo (Basse-Californie). | Cm. XXI |
| (Basse-Californie). | Cm. XX |
| (Coahuila). | Cm. XIV |
| La Nelfa Saint-André (Durango). | Cm. X |
| Tamazula (Jalisco). | Cm. X |
| (Jalisco). | Cm. XIV |

Santa Cecilia (Mexico). Cm. X
El Progeso (Michoacan). Cm. XX
(Morelos). Cm. XIV
Ilucyapan (Puebla). Cm. X
(Sinaloa). Cm. X
Alfredina Aryspe
(Sonora). Cm. X
Quintera (Sonora). Cm. XIV
Rio Chico (Sonora). Cm. XIV
Santa Barranca (Sonora). Cm. X
(Zacatecas). Cm. XIV

**Fer**

Cerro de Mercado
(Durango). Bm. V
Textillan (Oajaca). Bm. V
(Zacatecas). Bm. V
(Zacatecas). Bm. V

**Fluor**

(Zacatecas). Am. III

**Mercure**

Et. II

**Or**

Guadalupe (Chihuahua). Em. XVII
Pihuamo (Jalisco). Em. XVII
Batopilas (Mexico). Em. XVII
Rescate (Oajaca). Em. XVII
Churianiodi (Sinaloa). Em. XVII
(Sinaloa). Em. XVII
Minas Prietas (Sonora). Em. XVII

**Phosphore**

Ridonda. Am. XII

**Plomb**

Parral (Chihuahua). Dm. XX
Las Animas (Chihualua). Dm. XX
Santa Barbara (Chihua-
hua). Dm. XX
(Coahuila). Dm. XX
(Durango). Dm. XX
(Jalisco). Dm. XX
San Rafael (Mexico). Dm. XX
(Morelos). Dm. XX
Guadelupe (Nuevo Leon). Dm. XX
San Pedro Morreley
(Nuevo Leon). Dm. XX
(Puebla). Dm. XX
(Sinaloa). Dm. XX
(Sonora). Dm. XX
(Zacateras). Dm. XX

**Plomb et divers**

(Durango). Dm. XVI
(San Luis de
Potosi). Dm. XVI
(Sinaloa). Dm. XVI
(Zacatecas). Dm. XVI

**Silicium**

*Quartz*

(Puebla). Am. VIII

*Boule*

(Zacatecas). Am. VIII

*Opales*

Am. VIII

*Obsidienne*

Zinaparo. Am. VIII
(Puebla). Am. VIII

*Amiante*

(Zacatecas). Am. VIII

**Vanadium**

Charcas (San Luis de
Potosi. Dt. III

**Zinc**

Nostra Senora (Sinaloa). Dm. I
Pastora (Jalisco). Dm. I
(Zacatecas). Dm. I

---

## NORWÈGE

**Argent**

Kongsberg. Em. II
Kongsberg. Em. II

**Bismuth**

Bleka (Telemarka). Dt. III

**Cuivre**

Röraas. Cm. XII

**Fer**

Côte d'Arendal. Bm. I



**Nickel**

Bamble. Bt. II
Ringerike. Bt. II

**Phosphore**

*Apatites*

Kragerö (Wedestrand). Am. IX
Oddegarden. Am. IX

**Silicium**

*Quartz*

Aanderud. Am. VII

*Feldspaths*

Aanderud. Am. VIII
Cekmeda Spelbe. Am. VIII
Linnestad-Rawkestad. Am. VIII
Linnestad. Am. VIII
Odiby Isek. Am. VIII

*Pierres à aiguiser*

Frederikstad. Am. VIII
Frederikstad. Am. VIII
Porsgrund. Am. VIII

*Emeraude*

Moss. Am. VIII

**Titane**

Egersund. Bm. IX
Kragerö (Wedestrand). Bm. IX
Kragerö (Wedestraud). Bm. IX

---

## NOUVELLE-CALÉDONIE

**Carbone**

*Résine naturelle*

Kaori (Gomme de). Am. VII

**Calcium**

*Pierres lithographiques*

Ile Malo. Am. XVI
Ile Sainte-Marie. Am. XVI

**Chrome**

Helene. Bm. IX
Canala. Bm. IX
Saint-Vincent. Bm. IX

**Cobalt**

Port-Bouquet. Bt. II
Grande-Adelaïde. Bt. II

**Cuivre**

Pilou. Cm. III

**Mercure**

Nakely. Et. I

**Nickel**

Canala, etc. Et. II

**Plomb**

Meretrix. Dm. XX

---

## NOUVELLE-ÉCOSSE

**Or**

Em. XVIII

---

## NOUVELLES-HÉBRIDES

**Soufre**

Ile de Tana. Am. II.

---

## NOUVELLE-ZÉLANDE

**Argent**

Thames. Em. IV

---

## PORTUGAL

**Antimoine**

Sitio do Tojo. Dt. II
Tapada do Padre. Dt. II

**Carbone**

*Jayet*

Cabo Mondezo Am. V

**Cobalt**

Palhal. Bt. II

**Cuivre**

Cabeca Alta. Cm. X
Minaucas. Cm. X
Tinoca. Cm. VI

**Fer**

San Thiago (Alemtejo). Bm. XII

**Silicium**

*Amiante*

Arado da Castanheira. Am. VIII

---

## ROUMANIE

**Carbone**

*Pétrole*

Solontza (Bacau). Am. V

*Bitume*

Kampina (Buzeu). Am. VI

**Sodium**

*Sel gemme*

Slanic (Buzeu). Am. XIII

---

## RUSSIE

**Aluminium**

*Argiles réfractaires*

Blatoush (Oural). Bm. XVIII
Couronne de Pologne (Varsovie). Bm. XVIII

**Carbone**

*Pétrole*

Bacou (Caucase). Am. V

**Chrome**

Berezowsk (Sibérie). Bm. IX
(Oural). Bm. IX

**Cuivre**

Akthala (Caucase). Cm. IX
Bogoslowsk (Oural). Cm. III
Iekaterinenbourg (Perm). Cm. III

**Fer**

Cᵐᵉ de Pologne (Varsovie). Bm. XIV
Dombrowa (Pologne). Bm. XIV
Elisabethpol (Caucase). Bm. XI
Les Lacs. Bm. XV
Tarnowitz (Pologne). Bm. XIV

**Manganèse**

Kvirili (Caucase). Bt. I

**Mercure**

Nikitofka (Donetz). Et. II

**Or**

Berezowsk (Oural orient.) Em. XV
Berezowsk (Oural orient.) Em. XVI

**Phosphore**

Samorade (Orel). Am. IX

**Platine**

Njiné Taguil (Oural). Em. X

**Plomb**

Berezowsk (Oural orient.) Dm. XX

**Zinc**

Boleslaw (Pologne). Dm. VIII

---

## SÉNÉGAL

**Baryum**

Fendenka. Am. XIV

---

## SIAM

**Or**

K'Thong, K'Loi. Em. XVII

---

## SUÈDE

**Argent**

Sala. Em. II

**Chrome**

Roraas. Bm. IX

**Cuivre**

Fahlun. Cm. XIII

**Fer**

Dannemora. Bm. X
Gellivara. Bm. X
Marnas. Bm. XI
Norberg. Bm. X
(Dalécarlie). Bm. XI
Divers et produits. Bc. I

**Zinc**

Ammeberg. Dm. I

---

## SERBIE

**Chrome**

Bm. IX

**Cuivre**

Cm. XVI

**Silicium**

*Obsidienne*

Poseravatz. Am. VIII



## SUD-AFRICAINE (République)

**Or**

Angelo (Witwatersrand). Ec. II
Balmoral » Ec. II
Balmoral » Em. XIX
Blinkpoort » Ec. II
Buffelsdorn » Ec. II
Chimes » Ec. II
City and Suburban (Witwatersrand). Ec. II
Comet (Witwatersrand). Ec. II
Crœsus » Ec. II
Crown deep » Ec. II
Crown reef » Em. XIX
Droogheuvel » Em. XIX
Du Preez reef » Em. XIX
Durban Roodepoort » Ec. II
Edinburgh » Em. XIX
Ferreira » Ec. II
Ferreira » Em. XIX
Geldenhuis » Ec. II
Ginsberg » Em. XIX
Heidelberg » Ec. II
Jumpers » Ec. II
Langlaagte » Ec. II
Langlaagte estate » Em. XIX
Madeline » Em. XIX
May consolidated » Em. XIX
Metropolitan » Em. XIX
Midas » Ec. II
Modderfontein » Ec. II
New Heriot » Ec. II
Nigel » Ec. II
Nourse deep » Ec. II
Odessa » Em. XIX
Orion » Ec. II
Rietfontein » Ec. II
Rip » Ec. II
Rip » Em. XIX
Robinson » Ec. II
Robinson » Em. XIX
Rose deep » Ec. II
Royal » Em. XIX
Simmer and Jack » Ec. II
Teutonia mine » Em. XIX
United main reef Roodepoort (Witwatersrand) Ec. II
Van Ryn » Ec. II
Van Ryn » Em. XIX
Village main Reef » Em. XIX
Vogelstruis » Ec. II
Wemmer » Ec. II
Wemmer » Em. XIX
Witpoortje » Em. XIX
Witwatersrand (Knights) Ec. II
Witwatersrand (coupe géologique). Ec. II
Wolhuter (coupe géologique). Ec. II
Zuurbult reef (Doornkop) (Witwatersrand). Em. XIX

---

## SUISSE

**Calcium**

*Marbres*

(Valais). Am. XVIII

**Carbone**

*Asphalte*

Porentruy (Neuchatel). Am. VII

**Or**

Gondo. Em. XVI

**Sodium**

*Sel gemme*

Bex (Neuchatel) Am. XIII

---

## TONKIN

**Antimoine**

Ak-Koi. Dt. I
Monk-hay. Dt. I

**Carbone**

*Graphite*

Yen-baï. Am. V

**Cuivre**

Bien Dong (Lam). Cm. V

**Zinc**

Dong-Trieu. Dm I

### TRINIDAD

**Carbone**

*Bitume*

Lac de la Braie. Am. VI

---

### TUNISIE

**Baryum**

*Barytine*

Djebel Slata. Am. XIV

**Calcium**

*Gypse*

Djebel Ahmar. Am. XVII
Djebel Hammam. Am. XVII
Monastir. Am. XVII

**Cuivre**

Cheida. Cm. VI
Djebel Herruch. Cm. X

**Fer**

Djebel Hamrya. Bm. VI
Ganara Bm. VI
Kef Debba Bm. VI
Oued Zouara (Tabarca). Bm. XVI

**Mercure**

Djebel Oust. Et. II

**Phosphore**

*Phosphates de chaux*

Djebel Seldja. Am. XI
Djebel Skarna. Am. XI
Djebel Stah. Am. XI
Zaouich-bon-Médine. Am. XI

**Plomb**

Bou Gournein. Dm. XVII
Djebba. Dm. XVII
Djebel Reças. Dm. XVII
Djebel Reças. Dm. XVII
Djebel Trozza (Kairouan) Dm. XVII
Djebilet-el-Kohol. Dm. XVII
Kranguet-et-Tout (Beja). Dm. XVII

**Silicium**

*Quartz*

Djebel Khanil. Am. VIII

*Bois silicifié*

Am. VIII

**Sodium**

*Sel gemme*

Coudiat Hamacina. Am. XIII

**Zinc**

Bou Gournein. Dm. IV
Djebel Reças. Dm. IV
Kranguet-el-Tout. Dm. IV

---

### TURQUIE

**Aluminium**

*Kaolins*

(Asie mineure). Bm. XVIII

**Antimoine**

Sazty-Déré (Smyrne). Dt. I

**Bore**

*Pandermite*

Azizié (Sultan Cheir). Am. III

**Carbone**

*Asphalte*

Mer Morte (Judée). Am. VII

*Schistes bitumineux*

Abou-Abla (Syrie). Am. VII

**Chrome**

(Asie-Mineure). Bm. IX

**Magnésium**

*Magnésite*

Esky-Cheir (Asie-Min.) Am. XIV
Smyrne (Asie-Mineure). Am. XIV

**Manganèse**

Espié (Trébizonde). Bt. I

**Or**

Cab Tach (Karassi). Em. XVI

**Plomb et Divers**

Egri Aéré (Sarandjina). Dm. IX



### URUGUAY

**Or**

Cunapiru (Tacuarembo). Em. XIX

### VÉNÉZUÉLA

**Or**

El Callao. Em. XIV

---

# NOMENCLATURE

PAR

ORDRE ALPHABÉTIQUE

---

## A

Aanderud (Silicium). Am. VIII(*)
Aanderud (Silicium). Am. VIII
Abères (Les) (Plomb). Dm. XIII
Abla (Cuivre). Cm. IV
Abou-Abla (Carbone). Am. VII
Adakæ (Cuivre). Cm. V
Accous (Cuivre). Cm. VI
Achaiches (Cuivre). Cm. X
Acton (Cuivre). Cm. V
Aderville (Manganèse). Bt. I
Aguilas (Plomb). Dm. XIX
Ahlen (Strontium) Am. XIV
Aïn Abessa (Plomb). Dm. XV
Aïn Babouch (Antimoine) Dt. II
Aïn Barbar (Zinc). Dm. V
Ainhoa (Fer). Dm. VI
Aïn K'sar (Mercure). Et. II
Aïn Oudrer (Fer). Bm. XI
Aïn Sadouna (Fer). Bm. XVI
Aïn Safra (Zinc). Dm. V
Aïn Sba (Calcium). Am. XVIII
Aïn Sedma (Magnésium). Am. XIV
Aïn Sedma (Fer). Bm. I
Aïn Zeft Dahra (Carbone) Am. VI
Akiyoshi (Calcium). Am. XVIII
Ak Koi (Antimoine). Dt. I
Akroub (Plomb). Dm. XV
Akthala (Cuivre). Cm. IX
Alagna (Or). Em. XVI
Albert Mine (Carbone). Am. VI
Alfié (Bon d') (Or). Em. XII
Alfredina (Cuivre). Cm. X
Algérie (Aluminium). Bm. XVIII
Alice mine (Argent). Em. IV
Alleghany (Cuivre). Cm. VIII
Alleghany (Or). Em. XIV
Allemont (Cobalt). Bt. II
Allevard (Fer). Bm. VI
Almaden (Mercure). Et. I
Almaden (Mercure). Et. I
Almuradiel (Antimoine) Dt. I
Altenberg (Étain). Ct. II
Amenak (Carbone). Am. V
Ammeberg (Zinc). Dm. I
Amoura (Calcium). Am. XVII
Andreasberg (Zinc). Dm. I
Angelo (Or). Ec. II
Arado de Castanheira (Siliciun). Am. VIII
Arendal (côte d') (Fer). Bm. I
Argut (Fer). Bm. VI
Argut (Manganèse). Bt. I
Arre (Plomb et Divers). Dm. XII
Arrouach (Plomb). Dm. XIX
Asie-Mineure (Aluminium). Bm. XVIII

(*) Am. VIII signifie : Salle A Armoire murale VIII. Se reporter à la nomenclature par ordre de classement pour la nature du gisement et le numéro d'ordre de la collection correspondants.

Asie-Mineure (Chrome). Bm. IX
Aubin (Fer). Bm. XIII
Aureilles (Calcium). Am. XVIII
Austin (Argent). Em. III
Autun (Carbone). Am. VII
Ayrshire (Or). Em. XVII
Azib Zamoun (Mangan.). Bt. I
Azizié (Bore). Am. III

B

Bab M'Teurba (Fer). Bm. XIV
Bacou (Carbone). Am. V.
Bagnères - de - Luchon (Soufre). Am. II
Bahia (Diamant). Am. III
Balcony Falls (Calcium). Am. XVI
Balmoral (Or). Em. XIX
Balmoral (Or). Ec. II
Baltimore (Chrome). Bm. IX
Bamble (Nickel). Bt. II
Bancs rouges (Calcium). Am. XVI
Bangka (Étain). Ct. III
Barlet (Antimoine). Dt. II
Barra (Or). Em. XIII
Barrancanès (Cuivre). Cm. XI
Basse-Californie (Cuivre). Cm. XX
Bathvale (Carbone). Am. VI
Batopilas (Or). Em. XVII
Baume (La) (Plomb) Dm. XVI
Baux (Les) (Aluminium). Bm. XVIII
Beauval (Phosphore). Am. XI
Belmez (Phosphore). Am. X
Belmont (Plomb). Dm. XX
Beni Aquil (Cuivre). Cm. XIV
Beni Aquil (Fer). Bm. XVI
Beni Mimoun (Plomb). Dm. XV
Beni Mimoun (Fer). Bm. XI
Beni Mimoun (Cuivre). Cm. IV
Beni Mimoun (Calcium). Am. XVII
Beni Saf (Calcium). Am. XVII
Beni Saf (Fer). Bm. XIV
Beni Saïd (Magnésium). Am. XIV
Berchtesgaden (Sodium) Am. XIII
Bereghszasy (Aluminium). Bm. XVIII
Berezowsk (Chrôme). Bm. IX
Berezowsk (Or). Em. XV
Berezowsk (Or). Em. XVI
Berezowsk (Plomb). Dm. XX
Bex (Sodium). Am. XIII
Bezenet (Fer). Bm. XIII
Bien Dong (Cuivre). Cm. V
Billiton (Étain). Ct. III
Bingham (Argent). Em. III
Bir beni Salah (Plomb). Dm. XV
Biso (Aluminium). Bm. XVIII
Blatoush (Aluminium). Bm. XVIII
Bled-el-Hammam (Cuivre) Cm. XIV
Bleiberg (Plomb). Dm. XII
Bleka (Bismuth). Dt. III
Blinkpoort (Or). Ec. II
Boccheggiano (Cuivre). Cm. II
Bogoslowsk (Cuivre). Cm. III
Bohême (Aluminium). Bm XVIII
Bois d'Asson (Carbone). Am. VI
Boleo (Cuivre). Cm. XXI
Boleslaw (Zinc). Dm. VIII
Bolivie (Cuivre). Cm. V
Bolivie (Cuivre). Cm. V
Bong-Mieû (Or). Em. XVI
Bonnac (Arsenic). Dt. II
Bonnac (Tungstène). Bm. IX
Bordezac (Fer). Bm. XIV
Bords du Rhin (Plomb). Dm. IX
Boryslaw (Carbone). Am. V
Boryslaw (Carbone). Am. V
Bou Gournein (Plomb). Dm. XVII
Bou Gournein (Zinc). Dm. IV
Bouinan (Fer). Bm. XVI
Boujam (Cuivre). Cm. XIV
Boulder County (Or). Em. XIV
Bou Taleb (Plomb). Dm. XV
Bou Thelis (Calcium). Am. XVII
Bouzarea (Manganèse.) Bt. I
Bouzareah (Plomb). Dm. XIX
Boverbach (Baryum). Am. XIV
Bradshaw (Or). Em. XVII
Brasso (Fer). Bm. III
Brésil (Fer). Bm. XII
Brésil (Or). Em. XIV
Brieser Mauth (Antimoine). Dt. I





Briey (Fer). Bm. XIV
Brixleys (Cuivre). Cm. XVI
Buckingham (Silicium). Am. VIII
Buckingham (Phosphore) Am. IX
Buena Vista (Carbone). Am. VI
Buffelsdorn (Or). Ec. II
Bunker (Plomb). Dm. XVI
Burra-Burra (Cuivre). Cm. IX
Buxière-la-Grue (Carbone). Am. VII

C

Cabeca Alta (Cuivre). Cm. X
Cabo Mondezo (Carbone) Am. V
Cab Tach (Or). Em. XVI
Caceres (Phosphore). Am. X
Cachis (Argent). Em. II
Caderles (Plomb). Dm. XVI
Caen (Silicium). Am. VIII
Calahora (Mercure). Et. II
Calamita (Fer). Bm. XVII
Calavera (Zinc). Dm. VII
Californie (Or). Em. XV
Californie (Cuivre). Cm. VIII
Camerata (Fer). Bm. XI
Campiglia (Étain). Ct. III
Canala (Nickel). Bt. II
Canala (Chrome). Bm. IX
Canal du Midi (Calcium). Am. XVIII
Cap (Le) (Cuivre) Cm. XIX
Capo Rosso (Manganèse). Bt. I
Cap Tenez (Fer). Bm. XVI
Cap Tenez (Cuivre). Cm. IV
Carapatos (Or). Em. XIII
Carlisle (Or). Em. XVII
Carn-Brea (Étain). Ct. I
Castera Vertujan (Calc^m). Am. XVIII
Castletown (Argent). Em. II
Cavallo (Plomb). Dm. XV
Cekmeda (Silicium). Am. VIII
Cerro-del-Pasco (Argent). Em. II
Cerro-de-Mercado (Fer). Bm. V
Chabet-queraï (Fer). Bm. XI
Chalindrey (Fer). Bm. XV
Chanac (Antimoine). Dt. I
Chanarcillo (Plomb). Dm. XIII
Charcas (Vanadium). Dt. III
Charlestown (Phosphore). Am. XII
Chatanque (Argent). Em. II
Châteauverdun (Fer). Bm. VII
Chausse (Plomb). Dm. XX
Chavigny (Fer). Bm. XIV
Chazelles (Antimoine). Dt. II
Cheida (Cuivre). Cm. VI
Cheraia (Cuivre). Cm. IV
Chihuahua (Argent). Em. X
Chili (Géologie gén^le). Cc. III
Chili (Géologie gén^le). Cc. II
Chili (Géologie gén^le). Cc. II
Chili (Géologie gén^le). Cc. I
Chili (Géologie gén^le). Cc. I
Chili (Mercure). Et. II
Chili (Fer). Bm. V
Chili (Bore). Am. III
Chimes (Or). Ec. II
Chine (Fer). Bm. VI
Chine (Mercure). Et. II
Chorulque (Étain). Ct. II
Christel (Calcium). Am. XVII
Churianiodi (Or). Em. XVII
Cienpozuelos (Sodium). Am. XIV
Ciply (Phosphore). Am. XI
City and Suburban (Or). Ec. II
Clairac (Zinc). Dm. V
Cleydang (Etain). Ct. III
Coahuila (Plomb). Dm. XX
Coahuila (Cuivre). Cm. XIV
Colorado (Or). Em. XVII
Columbus (Bore). Am. III
Comet (Or). Ec. II
Comstock (Argent). Em. I
Comstock (Argent). Em. I
Condorcet (Strontium). Am. XIV
Constantine (Zinc). Dm. V
Cooper Queen (Cuivre). Cm. VIII
Copiapo (Calcium). Am. XVII
Corbigny (Calcium). Am. XVI
Corinthe (Magnésium). Am. XIV
Côte du Pacifique (Mercure, etc.). Ec.
Coudiat-Hamacima (Sodium). Am.

| | |
|---|---|
| Coudiat-Resas (Plomb). | Dm. XV |
| C$^{nes}$ de Pologne (Fer). | Bm. XIV |
| C$^{nes}$ de Pologne (Alumin.). | Bm. XVIII |
| Cripple-Creek (Or). | Em. XIV |
| Croatie (Fer). | Bm. V |
| Crœsus (Or). | Ec. II |
| Crown deep (Or). | Ec. II |
| Crown reef (Or). | Em. XIX |
| Csiklova (Cuivre). | Cm. X |
| Cuchevilliers (Phosph$^{re}$). | Am. XI |
| Cuiaba (Or). | Em. XI |
| Cunapiru (Or). | Em. XIX |
| Curaçao (Phosphore). | Am. XII |

## D

| | |
|---|---|
| Dadou (Plomb). | Dm. XVI |
| Daily and Alliance (Arg.). | Em. II |
| Dalécarlie (Fer)- | Bm. XI |
| Dalmatie (Plomb). | Dm. XIII |
| Dalmatie (Plomb). | Dm. XV |
| Dannemarie (Calcium). | Am. XVI |
| Dannemora (Fer). | Bm. X |
| Dar-el-Hamoud (Plomb). | Dm. XV |
| Dear Park (Titane). | Bm. IX |
| Derbyshire (Fluor). | Am. III |
| Descugano (Cuivre). | Cm. X |
| Devil's head Mountain (Fer). | Bm. XI |
| Diamantina (Diamant). | Am. III |
| Diélette (Fer). | Bm. XII et XIII |
| Diélette (Silicium). | Am. VIII |
| Djebba (Plomb). | Dm. XVII |
| Djebel Ahmar (Calcium). | Am. XVII |
| Djebel Bekal (Cuivre). | Cm. XIV |
| Djebel Chenouah (Calc.). | Am. XVIII |
| Djebel Fillaoucen (Zinc). | Dm. V |
| Djebel Hadid (Cuivre). | Cm. IV |
| Djebel Hadid (Fer). | Bm. XVI |
| Djebel Hammam (Calc.). | Am. XVII |
| Djebel Hamrya (Fer). | Bm. VI |
| Djebel Herruch (Cuivre). | Cm. X |
| Djebilet-el-Kohol (Pl$^{b}$). | Dm. XVII |
| Djebel Khanil (Silicium). | Am. VIII |
| Djebel Masser (Zinc). | Dm. V |
| Djebel Masser (Plomb). | Dm. XIX |
| Djebel Masser (Plomb). | Dm. XV |
| Djebel Orousse (Calc.). | Am. XVIII |
| Djebel Oust (Mercure). | Et. II |
| Djebel Reças (Zinc). | Dm. IV |
| Djebel Reças (Plomb). | Dm. XVII |
| Djebel Reças (Plomb). | Dm. XVII |
| Djebel Sanari (Sodium). | Am. XIV |
| Djebel Seldja (Phosph.). | Am. XI |
| Djebel Skarna (Phosph.). | Am. XI |
| Djebel Slata (Baryum). | Am. XIV |
| Djebel Stah (Phosphore). | Am. XI |
| Djebel Tadjera (Phosph.). | Am. XII |
| Djebel Taffat (Calcium). | Am. XVIII |
| Djebel Talouine (Cuivre). | Cm. XIV |
| Djebel Temoulga (Fer). | Bm. XV |
| Djebel Toumaï (Phosph.). | Am. XI |
| Djebel Trozza (Plomb). | Dm. XVII |
| Djendeli (Zinc). | Dm. V |
| Dobschau (Fer). | Bm. VI |
| Dobschau (Cobalt). | Bt. II |
| Dolcoath (Étain). | Ct. I |
| Dombrowa (Fer). | Bm. XIV |
| Dong-Trieu (Zinc). | Dm. I |
| Douar Medjadja (Fer). | Bm. XI |
| Droogheuvel (Or). | Em. XIX |
| Drumlummin (Argent). | Em. II |
| Dumbrava (Mercure). | Et. I |
| Duc-Bô (Zinc). | Dm. I |
| Ducktown (Cuivre). | Cm. VIII |
| Du Prez reef (Or). | Em. XIX |
| Durango (Plomb). | Dm. XX |
| Durango (Plomb). | Dm. XVI |
| Durban Roodepoort (Or). | Ec. II |

## E

| | |
|---|---|
| East Pool (Tungstène). | Bm. IX |
| Echternach (Calcium). | Am. XVII |
| Eckholshausen (Ph$^{re}$). | Am. XI |
| Édinburgh (Or). | Em. XIX |
| Egersund (Titane). | Bm. IX |
| Egeri Aéré (Plomb). | Dm. IX |
| Eimgheir (Plomb). | Dm. XIII |
| El Aminia (Plomb). | Dm. XIX |
| El Binta (Cobalt). | Bt. II |
| El Callao (Or). | Em. XIV |
| El Greso (Antimoine). | Dt. II |



| | |
|---|---|
| Elisabethpol (Fer). | Bm. XI |
| Ellnbogen (Carbone). | Am. V |
| El Outaya (Sodium). | Am. XIII |
| El Progreso (Cuivre). | Cm. XX |
| Esky-Cheir (Magnésium). | Am. XIV |
| Espie (Manganèse). | Bt. I |
| Estrella (Cuivre). | Cm. VII |
| États-Unis (Aluminium). | Bm. XVIII |
| Euch-el-Bez (Chrome). | Bm. IX |
| Eule (Or). | Em. XVIII |
| Evigtok (Aluminium). | Bm. XVIII |
| Exincourt (Fer). | Bm. XVI |

## F

| | |
|---|---|
| Fahlun (Cuivre) | Cm. XIII |
| Fendenka (Baryum). | Am. XIV |
| Ferreira (Or). | Ec. II |
| Ferreira (Or). | Em. XIX |
| Ferrusac (Plomb). | Dm. XVI |
| Filfila (Calcium). | Am. XVIII |
| Fillols (Fer). | Bm. VIII |
| Fins (Fer). | Bm. XIII |
| Fleurus (Calcium). | Am. XVII |
| Fleurus (Baryum). | Am. XIV |
| Flogny (Fer). | Bm. XVII |
| Floride (Phosphore). | Am. XII |
| Framont (Fer). | Bm. XI |
| France (Calcium). | Am. XV |
| France (Calcium). | Am. XVI |
| Fredericksstad (Silic.). | Am. VIII |
| Fredericksstad (Silic.). | Am. VIII |
| Freycenet (Antimoine). | Dt. II |
| Frongoch Mine (Plomb). | Dm. XIX |
| Fumel (Fer). | Bm. XIV |

## G

| | |
|---|---|
| Gabès (Calcium). | Am. XVIII |
| Ganara (Fer). | Bm. VI |
| Gard (Strontium). | Am. XIV |
| Gargantilla (Cuivre). | Cm. VII |
| Gar Rouban (Fluor). | Am III |
| Gar Rouban (Plomb). | Dm. XVI |
| Geldenhnis (Or). | Ec. II |
| Gellivara (Fer). | Bm. X |
| Genolhac (Plomb). | Dtr. II |
| Georgetown (Argent). | Em. III |
| Gharbou (Zinc). | Dm. I |
| Ghar-el-Kohol (Plomb). | Dm. XV |
| Ghil-oum-Djinn (Cuiv$^{re}$). | Cm. XIV |
| Gimouille (Fer). | Bm. XV |
| Ginsberg (Or). | Em. XIX |
| Goldberg (Plomb). | Dm. XII |
| Gollnitz (Cuivre). | Cm. III |
| Gondo (Or). | Em. XVI |
| Gorges de Rigas (Cuivre). | Cm. X |
| Gourraya (Fer). | Bm. XVI |
| Gourraya (Cuivre). | Cm. XIV |
| Gourbesville (Phosph.). | Am. XII |
| Granagiolo (Antimoine). | Dt. I |
| Gr$^{de}$-Adelaïde (Cobalt). | Bt. II |
| Grand-Clos (Plomb). | Dm. XVII |
| Gr$^{de}$-Vernissière (Fluor). | Am. III |
| Grandpré (Phosphore). | Am. XI |
| Grèce (Silicium). | Am VIII |
| Guadalupe (Or). | Em. XVII |
| Guadalupe (Plomb). | Dm. XX |
| Guerrouma (Plomb). | Dm. XV |
| Guerrouma (Zinc). | Dm. V |
| Guntang (Etain). | Ct. III |
| Gympie (Or). | Em. XVII |

## H

| | |
|---|---|
| Hamimat-Arks (Zinc). | Dm. V |
| Hammam N'bails (Zinc). | Dm. V |
| Hardivilliers (Phosph.). | Am. XI |
| Harrouch (Calcium). | Am. XVII |
| Harz (Plomb, Cuivre). | Dc. III |
| Hayange (Fer). | Bm. XV |
| Helene (Chrome). | Bm. IX |
| Heidelberg (Or). | Ec. II |
| Highland (Or). | Em. XIV |
| Hongrie (Fer). | Bm. V |
| Hongrie (Sodium). | Am. XIV |
| Horcajo (Plomb). | Dm. XVII |
| Huchuctlan (Calcium). | Am. XVII |
| Huelgoat (Antimoine). | Dt. II |
| Huelgoat (Plomb). | Dm. XIV |

## I

| | |
|---|---|
| Idria (Mercure). | Em. XX |
| Idria (Mercure). | Em. XX |
| Idria (Mercure). | Em. XX |

| | |
|---|---|
| Iekaterinenbourg (Cuiv.). | Cm. III |
| Iglesias (Zinc). | Dm. III |
| Iglo (Calcium). | Am. XVII |
| Iglo (Antimoine). | Dt. I |
| Ikouno (Argent). | Em. IV |
| Ile Malo (Calcium). | Am. XVI |
| Ile Ste-Marie (Calcium). | Am. XVI |
| Ilucyapan (Cuivre). | Cm. X |
| Inde (Chrome). | Bm. IX |
| Inkermann (Phosph.). | Am. XII |
| Italie (Carbone). | Am. V |
| Izenay (Fer). | Bm. XV |

## J

| | |
|---|---|
| Jagers et Coffee Fontein (Carbone). | Am. IV |
| Jalisco (Plomb). | Dm. XX |
| Jalisco (Cuivre). | Cm. XIV |
| Jalisco (Argent). | Em. VIII |
| Joao Julio d'Ahrarenga (Or). | Em. XIII |
| Jubilu (Argent). | Em. II |
| Julianshaab (Carbone). | Am. V |
| Jumpers (Or). | Ec. II |

## K

| | |
|---|---|
| Kalaa K'bail (Zinc). | Dm. V |
| Kampina (Carbone). | Am. VI |
| Kanagassi (Cuivre). | Cm. V |
| Kandirou (Fer). | Bm. XV |
| Kandirou (Cuivre). | Cm. XIV |
| Karombo (Calcium). | Am. XVII |
| Kef-Debba (Fer). | Bm. VI |
| Kef-oum-Teboul (Cuiv.). | Cm. IV |
| Kimberley (Carbone). | Am. IV |
| Kimberley (Carbone). | Am. IV |
| Kongsberg (Argent). | Em. II |
| Kongsberg (Argent). | Em. II |
| Kotterbach (Fer). | Bm. III |
| Kragerœ (Titane). | Bm. IX |
| Kragerœ (Phosphore). | Am. IX |
| Kranguet-el-Tout (Zinc). | Dm. IV |
| Kranguet-el-Tout (Pl$^b$). | Dm. XVII |
| Krummau (Carbone). | Am. V |
| K'Thong (Or). | Em. XVII |
| Kvirili (Manganèse). | Bt. I |

## L

| | |
|---|---|
| Labarthe (Calcium). | Am. XVIII |
| La Caverita (Argent). | Em. VIII |
| La Calle (Plomb). | Dm. XIX |
| La Calle (Cuivre). | Cm. X |
| Lac Bolzano (Soufre). | Am. II |
| Lac de la Braie (Carbone). | Am. VI |
| Lac Champlain (Fer). | Bm. X |
| La Chapelle-en-Juger (Mercure). | Et. I |
| La Couraya (Manganèse). | Bt. I |
| Lac Supérieur (Fer). | Bm. XII |
| Lac Supérieur (Cuivre). | Cm. XVII |
| Lac Supérieur (Cuivre). | Cm. XVIII |
| Lac Supérieur (Cuivre). | Cm. XIX |
| Lac Supérieur (Fer). | Bm. XII |
| La Fage (Antimoine). | Dt. II |
| La Garde (Silicium). | Am. VIII |
| La Gardette (Or). | Em. XVI |
| La Licoulne (Antimoine). | Dt. I |
| La Malou (Cuivre). | Cm. IX |
| La Malou (Baryum). | Am. XIV |
| La Nelfa S$^t$ André (Cuiv.). | Cm. X |
| Langeac (Fluor). | Am. III |
| Langlaagte (Or). | Ec. II |
| Langlaagte Estate (Or). | Em. XIX |
| La Prugne (Cuivre). | Cm. II |
| Larrhat (Fer). | Bm. XVI |
| Las Animas (Plomb). | Dm. XX |
| Las Cabessès (Mang.). | Bt. I |
| La Tolfa (Aluminium). | Bm. XVIII |
| La Tour Batère (Fer). | Bm. VI |
| Laurium (Zinc). | Dm. II |
| Laurium (Zinc et divers). | Bc. II |
| Laurium (Plomb). | Dm. XIX |
| La Villeder (Étain). | Ct. II |
| La Voulte (Fer). | Bm. XV |
| La Voute Chilhac (Silicium). | Am. VIII |
| La Voute Chilhac (Zinc). | Dm. I |
| Leadville (Argent). | Em. III |
| Le Genest (Antimoine). | Dt. I |
| Leogang (Calcium). | Am. XVII |
| Leogang (Cuivre). | Cm. V |
| Les Challanches (Nickel). | Bt. II |



| | |
|---|---|
| Les Écouchets (Chrome) | Bm. IX |
| Les Lacs (Fer). | Bm. XV |
| Letto Manopello (Carb.). | Am. VII |
| Libethbanya (Fer). | Bm. III |
| Linarès (Zinc). | Dm. VII |
| Linnestad (Silicium). | Am. VIII |
| Linnestad (Silicium). | Am. VIII |
| Lirac et Tavel (Ph$^{re}$). | Am. XI |
| Littai (Mercure). | Et. I |
| L'lanidloes (Plomb). | Dm. XIX |
| Logrosan (Phosphore). | Am. X |
| Lubella (Antimoine). | Dt. II |
| Lyon (Env. de) (Or). | Em. XVI |

## M

| | |
|---|---|
| Maazis (Zinc). | Dm. V |
| Maazis (Plomb). | Dm. XV |
| Madeline (Or). | Em. XIX |
| Madrid (Plomb). | Dm. XIX |
| Makarka (Carbone). | Am. VI |
| Malfidano (Zinc). | Dm. IV |
| Malines (Les) (Zinc). | Dm. VI |
| Mammoth Miue (Or). | Em. XIV |
| Mammoth Mine (Argent). | Em. III |
| Mandoudi (Magnésium). | Am. XIV |
| Mansfeld (Cuivre). | Cm. XX |
| Maouaria (Fer). | Bm. XI |
| Maquiné (Or). | Em. XIII |
| Marmaros Sziget (Fer). | Bm. II |
| Maros-Ujvar (Sodium). | Am. XIII |
| Marsanges (Fluor). | Am. III |
| Marsanne (Silicium). | Am. VIII |
| Marnas (Fer). | Bm. XI |
| Maudesse (Zinc). | Dm. V |
| May Consolidated (Or). | Em. XIX |
| Mayet-en-Montagne (Manganèse). | Bt. I |
| Mayet-en-Montagne (Soufre). | Am. III |
| Mayflower (Or). | Em. XIV |
| Mazenay (Fer). | Bm. XV |
| Meboudga (Fer). | Bm. I |
| Mechernich (Plomb). | Dm. XXI |
| Mellenaer (Etain). | Ct. I |
| Melousla (Plomb). | Dm. XV |
| Menat (Silicium). | Am. VIII |
| Menat (Carbone). | Am. VII |
| Mendoza (Plomb). | Dm. XIX |
| Mendoza (Argent). | Em. I |
| Mensula (Plomb). | Dtr. II |
| Meretrix (Plomb). | Dm. XX |
| Mer Morte (Carbone). | Am. VII |
| Mers-el-Kebir (Calcium). | Am. XVII |
| Merzelet (Fer). | Bm. XIV |
| Messelmann (Fer). | Bm. XVI |
| Metropolitan (Or). | Em. XIX |
| Meudon (Calcium). | Am. XVI |
| Meymac (Bismuth). | Dt. III |
| Meymac (Tungstène). | Bm. IX |
| Mexico (Argent). | Em. VIII |
| Mexique (Mercure). | Et. II |
| Mexique (Silicium). | Am. VIII |
| Michoacan (Argent). | Em. VIII |
| Midas (Or). | Ec. II |
| Mieres-Oviedo (Mercure). | Et. I |
| Milah (Calcium). | Am. XVII |
| Milah (Sodium). | Am. XIII |
| Minasaka (Étain). | Ct. III |
| Minas Prietas (Or). | Em. XVII |
| Minaucas (Cuivre). | Cm X |
| Miria (Antimoine). | Dt. I |
| Modderfontein (Or). | Ec. II |
| Mokta-el-Hadid (Fer). | Bm. XII |
| Mollie Gibson (Argent). | Em. II |
| Monastir (Calcium). | Am. XVII |
| Mondalazac (Fer). | Bm. XV |
| Monk-hay (Antimoine). | Dt. I |
| Mont Cenis (Uranium). | Bm. IX |
| Mont du Lys (Silicium). | Am. VIII |
| Monte Agruxau (Zinc). | Dm. III |
| Montebras (Étain). | Ct. II |
| Monte-Catini (Cuivre). | Cm. I et II |
| Monte-Cavallo (Ant$^{ne}$). | Dt. I |
| Monte-Narba (Argent). | Em. VIII |
| Monteponi (Zinc). | Dm. III |
| Montigny-s$^r$-Arm (Ph$^{re}$). | Am. XI |
| Monts-en-Ternois (Fer). | Bm. XVI |
| Moravicza (Fer). | Bm. II |
| Morée (Cuivre). | Cm. IX |
| Morelos (Cuivre). | Cm. XIV |
| Morelos (Plomb). | Dm. XX |
| Moro Velho (Or). | Em. XII |

| | |
|---|---|
| Morre (Aluminium). | Bm. XVIII |
| Moss (Silicium). | Am. VIII |
| Motherlode (Argent). | Em. II |
| Moulineaux (Calcium). | Am. XVI |
| Mouzaïa (Cuivre). | Cm. IV |
| Mouzaïa (Cuivre). | Cm. XIV |
| M'rabdine (Fer). | Bm. XI |

## N

| | |
|---|---|
| Nades (Antimoine). | Dt. II |
| Nador Sheir (Plomb). | Dm. XV |
| Nagyag (Or). | Em. XVII |
| Nakely (Mercure). | Et. I |
| Naples (Soufre). | Am. II |
| Navassa (Phosphore). | Am. XII |
| Naxos (Aluminium). | Bm. XVIII |
| Negrita (Cuivre). | Cm. XI |
| Neunkirchen (Fer). | Bm. XIII |
| New Almaden (Mercure). | Et. II |
| New Heriot (Or). | Ec. II |
| Nieddores Flumines (Antimoine). | Dt. II |
| Nigel (Or). | Ec. II |
| Nijné Miassk (Or). | Em. XVI |
| Nijné Taguil (Platine). | Em. X |
| Nikitofka (Mercure). | Et. II |
| Norberg (Fer). | Bm. X |
| Nostra Senora (Zinc). | Dm. I |
| Nottingham (Fluor). | Am. III |
| Nourse deep (Or). | Ec. II |
| N$^{lle}$-Calédonie (Carb.). | Am. VII |
| N$^{lle}$-Calédonie (Calcium). | Am. XVI |
| Nouvelle-Écosse (Or). | Em. XVIII |

## O

| | |
|---|---|
| Oajaca (Argent). | Em. VIII |
| Oddegarden (Phosphore) | Am. IX |
| Odessa (Or). | Em. XIX |
| Odiby-Isek (Silicium). | Am. VIII |
| Offenbanya (Or). | Em. XVII |
| Oran (Cuivre). | Cm. IV |
| Orion (Or). | Ec. II |
| Oruro (Argent). | Em. IV |
| Oruro (Étain). | Ct. II |
| Ouarsenis (Zinc). | Dm. V |
| Ouarsenis (Plomb). | Dm. XV |
| Ouarsenis (Fer). | Bm. XV |
| Oued Allelah (Cuivre). | Cm. XIV |
| Oued Allelah (Cuivre) | Cm. IV |
| Oued Bounan (Cuivre). | Cm. XIV |
| Oued Bordja (Plomb). | Dm. XV |
| Oued-bou-Allou (Cuivre). | Cm. IV |
| Oued Boughi (Mercure). | Et. II |
| Oued Djer (Fer). | Bm. XVI |
| Oued Kebir (Cuivre). | Cm. IV |
| Oued K'Seul (Cuivre). | Cm. IV |
| Oued Melah (Cuivre). | Cm. IV |
| Oued Merdja (Cuivre). | Cm. IV |
| Oued Rehan (Plomb). | Dm. XV |
| Oued Rouina (Fer). | Bm. XV |
| Oued Sidi Rhibir (Cuiv.). | Cm. XIV |
| Oued Zouara (Fer). | Bm. XVI |
| Ougney (Fer). | Bm. XV |
| Ouled Khebed (Sodium). | Am. XIII |
| Ouled Nouar (Fer). | Bm. XI |
| Oural (Chrome). | Bm. IX |
| Owari (Nickel). | Bt. II |

## P

| | |
|---|---|
| Pacientia (Or). | Em. XII |
| Paderm (Cuivre). | Cm. XIV |
| Palaiseau (Calcium). | Am. XVII |
| Palerme (Soufre). | Am. II |
| Palerme (Strontium). | Am. XIV |
| Palhal (Cobalt). | Bt. II |
| Pampinello (Soufre). | Am. II |
| Pampinello (Sodium). | Am. XIV |
| Parkside (Fer). | Bm. XIII |
| Parral (Plomb). | Dm. XX |
| Pary (Or). | Em. XIII |
| Passagem (Or). | Em. XI |
| Pastora (Zinc). | Dm. I |
| Penatlor (Phosphore). | Am. X |
| Penestin (Etain). | Ct. III |
| Pentes (Étain). | Ct. III |
| Penuta (Étain). | Ct. II |
| Perak (Etain). | Ct. III |
| Pestarana (Or). | Em. XVI |
| Petaï (Etain). | Ct. III |
| Petite Kabylie (Cuivre). | Cm. XVI |
| Picos de Europa (Zinc). | Dm. I |
| Picos del Pando (Zinc). | Dm. I |



| | |
|---|---|
| Pietra Mala (Silicium). | Am. VIII |
| Pihuamo (Or). | Em. XVII |
| Pilou (Cuivre). | Cm. III |
| Piriac (Etain). | Ct. III |
| Piscataquis (Silicium). | Am. VIII |
| Pointe Pescade (Plomb). | Dm. XIX |
| Pont-du-Château (Carb.). | Am. VI |
| Ponte-alla-Lecchia (Cuivre). | Cm. II |
| Pontpean (Plomb). | Dm. XIV |
| Porentruy (Carbone). | Am. VII |
| Porsgrund (Silicium). | Am. VIII |
| Port-Bouquet (Cobalt). | Bt. II |
| Portes (Fer). | Bm. XIII |
| Posadel Norte (Calcium). | Am. XVIII |
| Poseravatz (Silicium). | Am. VIII |
| Potocnig (Mercure). | Et. I |
| Poullaouen (Plomb). | Dm. XIV |
| Pourain (Fer). | Bm. XVII |
| Prades (Fer). | Bm. VIII |
| Prades (Plomb). | Dm. XX |
| Privas (Fer). | Bm. XV |
| Providenzia (Cuivre). | Cm VII |
| Puebla (Argent). | Em. VIII |
| Puebla (Plomb). | Dm. XX |
| Puebla (Silicium). | Am. VIII |
| Puebla (Silicium). | Am. VIII |
| Puloh-Brani (Étain). | Ct. III |
| Pursatt (Calcium). | Am. XVIII |
| Puy-les-Vignes (Tungstène). | Bm. IX |

## Q

| | |
|---|---|
| Quercy (Phosphore). | Am. X |
| Quintera (Cuivre). | Cm. XIV |
| Quissac (Phosphore). | Am. XI |

## R

| | |
|---|---|
| Racles (Antimoine). | Dt. II |
| Raleigh (Carbone). | Am. V |
| Rammelsberg (Cuivre). | Cm. XX |
| Rancié (Fer). | Bm. VII |
| Rapazos (Or). | Em. XI |
| Ras Elma (Mercure). | Et. II |
| Ravin bleu (Calcium). | Am. XVI |
| Ravin du Hadjail (Cuiv.). | Cm. X |
| Reocin (Zinc). | Dm. VI |
| Rescate (Or). | Em. XVII |
| Ridonda (Phosphore). | Am. XII |
| Rietfontein (Or). | Ec. II |
| Rifkoh (Carbone). | Am. V |
| Rimamurany (Fer). | Bm III |
| Rimont (Manganèse). | Bt. I |
| Ringerike (Nickel). | Bt. II |
| Rio-Chico (Cuivre). | Cm. XIV |
| Rio-Tinto (Cuivre). | Cm. XI |
| Rip (Or). | Ec. II |
| Rip (Or). | Em. XIX |
| Rivernert (Fer). | Bm. VI |
| Robinson (Or). | Em. XIX |
| Robinson (Or). | Ec. II |
| Rocca Tederighi (Cuivre). | Cm. II |
| Rocks Springs (Titane). | Bm. IX |
| Rodna (Argent). | Em. VII |
| Rohnicz (Fer). | Bm. III |
| Romanèche (Manganèse). | Bt. I |
| Ronaszet (Sodium). | Am. XIII |
| Roraas (Cuivre). | Cm. XII |
| Roraas (Chrome). | Bm. IX |
| Rosario (Cuivre). | Cm. VIII |
| Rose deep (Or). | Ec. II |
| Rosia (Antimoine). | Dt. I |
| Rovigo (Calcium). | Am. XVII |
| Royal (Or). | Em. XIX |

## S

| | |
|---|---|
| Saignon (Soufre). | Am. II |
| Sain-Bel (Soufre). | Am. III |
| Saint-Avold (Plomb). | Dm. XXI |
| Saint-Béat (Calcium). | Am. XVIII |
| Saint-Béat (Soufre). | Am. II |
| Saint-Éloy (Fer). | Bm. XIII |
| Sainte-Marie-aux-Mines (Arsenic). | Dt. II |
| Saint-Florent (Fer). | Bm. XVI |
| Saint-Julien (Zinc). | Dm V |
| Saint-Laurent (Zinc). | Dm. VI |
| Saint-Martin (Soufre). | Am. II |
| St-Pals-de-Murs (Plomb). | Dm. XVI |
| Saint-Pancré (Fer). | Bm. XV |
| Saint-Priest (Fer). | Bm. XV |
| S$^{t}$-Quentin (Manganèse). | Bt. I |

| | | |
|---|---|---|
| Saint-Victor (Calcium). | Am. | XVI |
| Saint-Vincent (Chrôme). | Bm. | IX |
| Saint-Yrieix (Aluminium) | Bm. | XVIII |
| Sakamody (Zinc). | Dm. | IV |
| Sala (Argent). | Em. | II |
| Salabro (Carbone). | Am. | IV |
| Saligny (Fer). | Bm. | XIV |
| Samland (Carbone). | Am. | V |
| Samorade (Phosphore). | Am. | IX |
| San Cataldo (Soufre). | Am. | II |
| Sandgate (Calcium). | Am. | XVI |
| Sandstone (Carbone). | Am. | VI |
| Sandstone (Carbone). | Am. | VI |
| San Francisco (Bore). | Am. | III |
| San Luis (Manganèse). | Bt. | I |
| San Luis de Potosi (Arg.). | Em. | VIII |
| San Luis de Potosi ($P^b$). | Dm. | XVI |
| San Manuel (Étain). | Ct. | II |
| San Narciso (Zinc). | Dm. | VII |
| San Pedro Morreley ($P^b$). | Dm. | XX |
| San Rafael (Plomb). | Dm. | XX |
| San Rafael Penoles (Arg.) | Em. | VIII |
| Santa Barbara (Plomb). | Dm. | XX |
| Santa Barranca (Cuivre). | Cm. | X |
| Santa Cécilia (Cuivre). | Cm. | X |
| Santa Inez (Argent). | Em. | VIII |
| Santa Rosalia (Argent). | Em. | X |
| San Thiago (Fer). | Bm. | XII |
| Santo Domingo (Or). | Em. | XVII |
| Sao Bento (Or) | Em. | XIII |
| Sao Luiz (Or). | Em. | XII |
| Sarawak (Antimoine). | Dt. | I |
| Sarrabus (Argent). | Em. | V |
| Sarrabus (Argent). | Em. | VI et VII |
| Sarrabus (Argent). | Em. | V et VI |
| Sarre (La) (Plomb). | Dm. | XIII |
| Sarre (La) (Fer). | Bm. | XIII |
| Sarre (La) (Cuivre). | Cm. | VI |
| Sarre (La) (Manganèse). | Bt. | I |
| Sarreguemines (Alumin.). | Bm. | XVIII |
| Sassagatani (Cuivre). | Cm. | V |
| Satsuna (Or). | Em. | XVII |
| Saumane (Fer). | Bm. | XI |
| Saxe (Plomb, Cuivre). | Dc. | I |
| Sazty Déré (Antimoine). | Dt. | I |
| Schemnitz (Plomb, Cuivre, etc.). | Dc. | III |
| Schemnitz (Plomb). | Dm. | X XI, XII |
| Schirmeck (Cuivre). | Cm. | XX |
| Schneeberg (Cobalt). | Bt. | II |
| Segré (Fer). | Bm. | XII |
| Semipalatensk (Manganèse). | Bt. | I |
| Serbie (Chrome) | Bm. | IX |
| Serbie (Cuivre). | Cm. | XVI |
| Seriphos (Fer). | Bm. | XII |
| Sestrade (Plomb). | Dm. | XIX |
| Seyssel-Belley (Carbone). | Am. | VII |
| Sgudicato (Zinc). | Dm. | I |
| Shasta (Chrome). | Bm. | IX |
| Sheridan (Or). | Em. | XIV |
| Sidi Arama (Plomb). | Dm. | XV |
| Sidi Bou Aissi (Cuivre.) | Cm. | XIV |
| Sidi Brahim (Calcium). | Am. | XVIII |
| Sidi Camber (Plomb). | Dm. | XIX |
| Sidi Saf (Fer). | Bm. | XV |
| Sidi Sliman (Fer). | Bm. | XV |
| Siele (Mercure). | Et. | II |
| Sierra Almagrera (Arg.). | Em. | VIII |
| Sierra de Carthagène (Plomb). | Dm. | XVIII |
| Sierra Nevada (Antim$^{ne}$). | Dt. | I |
| Sierra Nevada (Cuivre). | Cm. | XV |
| Silésie (Fer). | Bm. | V |
| Silver King (Argent). | Em. | II |
| Simmer and Jack (Or). | Ec. | II |
| Simmon's reef (Or). | Em. | XVII |
| Sinaloa (Plomb). | Dm. | XVI |
| Sinaloa (Plomb). | Dm. | XX |
| Sinaloa (Or). | Em. | XVII |
| Sinaloa (Cuivre). | Cm. | X |
| Sinaloa (Argent). | Em. | X |
| Sitio de Tojo (Antimoine). | Dt. | II |
| Souk-Ahras (Phosphore). | Am. | XII |
| Skyros (Chrome). | Bm. | IX |
| Slanic (Sodium). | Am. | XIII |
| Slovenka (Cuivre). | Cm. | XII |
| Smyrne (Magnésium). | Am. | XIV |
| Solenhofen (Calcium). | Am. | XVI |



| | | |
|---|---|---|
| Solgatayan (Sodium). | Am. | XIII |
| Solonitza (Carbone). | Am. | V |
| Somorrostro (Fer). | Bm. | XVI |
| Sonoma Cy (Carbone). | Am. | V |
| Sonora (Argent). | Em. | VIII |
| Sonora (Plomb). | Dm. | XX |
| Soumah (Fer). | Bm. | XVI |
| Soumah (Cuivre). | Cm. | X |
| Stassfurt (Potassium). | Am. | XIII |
| Suderœ (Carbone). | Am. | V |
| Snèdé (Fer). | Bc. | I |
| Sumatra (Cuivre). | Cm. | V |
| Su Suergin (Antimoine). | Dt. | II |
| Svatz (Cuivre). | Cm. | XVI |
| Swordrowitz (Soufre) | Am. | II |

## T

| | | |
|---|---|---|
| Tadergount (Cuivre). | Cm. | XIV |
| Tailhac (Antimoine). | Dt. | II |
| Tailhac (Plomb). | Dm. | XX |
| Tajova (Silicium). | Am. | VIII |
| Tamaya (Cuivre). | Cm. | VI |
| Tamazula (Cuivre). | Cm. | X |
| Tana (Soufre). | Am. | II |
| Tapada do Padre (Antim.). | Dt. | II |
| Tapets (Les) (Soufre). | Am. | II |
| Tarnowitz (Fer). | Bm. | XIV |
| Tarnowitz (Zinc). | Dm. | VIII |
| Tazout (Plomb). | Dm. | XIX |
| Tazout (Fer). | Bm. | XV |
| Tebilga (Antimoine). | Dt. | II |
| Teil (Le) (Aluminium). | Bm. | XVIII |
| Tekbalet (Calcium). | Am. | XVIII |
| Tepic (Argent). | Em. | VIII |
| Terrico (Cuivre). | Cm. | II |
| Teutonia mine (Or). | Em. | XIX |
| Textillan (Fer). | Bm. | V |
| Thames (Argent). | Em. | IV |
| Thostes (Fer). | Bm. | XIV |
| Tinoca (Cuivre). | Cm. | VI |
| Tinoco (Or). | Em. | XII |
| Tiszolez (Fer). | Bm. | II |
| Tolède (Cuivre). | Cm. | V |
| Torre de las Siete Esquinas (Cuivre). | Cm. | XV |
| Transylvanie (Calcium). | Am. | XVIII |
| Traverselle (Fer). | Bm. | III, IV |
| Traverselle (Fer). | Bm. | III |
| Traverselle (Fer). | Bm. | IV |
| Trifail (Calcium). | Am. | XVI |
| Tunisie (Silicium). | Am. | VII |
| Tuolumne (Carbone). | Am. | V |
| Tyghit-Saygta (Mercure). | Et. | I |

## U

| | | |
|---|---|---|
| Union (Plomb). | Dm. | XVIII |
| United M. R. Roodepoort (Or). | Ec. | II |
| Urson (Fluor). | Am. | III |
| Urvolgy (Argent). | Em. | VII |
| Usseglio (Cobalt). | Bt. | II |

## V

| | | |
|---|---|---|
| Valais (Calcium). | Am. | XVIII |
| Valence (Cuivre). | Cm. | XV |
| Vallée de l'Yvette (Calc.) | Am. | XVII |
| Vallée d'Ossau (Calcium). | Am. | XVIII |
| Vallendar (Aluminium). | Bm. | XVIII |
| Val Romano (Carbone). | Am. | VII |
| Vals Trompia (Plomb). | Dm. | XIII |
| Val Troppa (Or). | Em. | XVI |
| Van Ryn (Or). | Em. | XIX |
| Van Ryn (Or). | Ec. | II |
| Vaulry (Etain). | Ct. | III |
| Vaulry (Tungstène). | Bm. | IX |
| Verdad (Cuivre). | Cm. | VII |
| Verespatak (Or). | Em. | XVII |
| Veterand (Argent). | Em. | IV |
| Veyras (Fer). | Bm. | XV |
| Vialas (Plomb). | Dm. | XV |
| Vieille-Montagne (Zinc). | Dm. | VIII |
| Vigan (Le) (Strontium). | Am. | XIV |
| Village M. R. (Or). | Em. | XIX |
| Villapourçon (Calcium). | Am. | XVIII |
| Villarosa (Soufre). | Am. | II |
| Villebon (Calcium). | Am. | XVII |
| Villevayrac (Aluminium). | Bm. | XVIII |
| Virginie (Plomb). | Dm. | XIX |
| Vogelstruis (Or). | Ec. | II |
| Voile Noiro (Manganèse). | Bt. | I |
| Vosges (Silicium). | Am. | VIII |
| Vasada (Or). | Em. | XII |

| | |
|---|---|
| Vassy (Fer). | Bm. XV |
| Vaussujeau (Fer). | Bm. XI |
| **W** | |
| Wemmer (Or). | Ec. II |
| Wemmer (Or). | Em. XIX |
| Witpoortje (Or). | Em. XIX |
| Witwatersrand (Or). | Ec. II |
| Witwatersrand (Or). | Ec. II |
| Wolhuter (Or). | Ec. II |
| **X** | |
| Xeres-Lanteira (Cuivre). | Cm. V |
| Xicotlan (Calcium). | Am. XVII |
| **Y** | |
| Yamato (Mercure). | Et. II |
| Yeffi (Fer). | Bm. XVII |
| Yen-Bai (Carbone). | Am. V |
| **Z** | |
| Zacatecas (Fluor). | Am. III |
| Zacatecas (Silicium). | Am. VIII |
| Zacatecas (Silicium). | Am. VIII |
| Zacatecas (Calcium). | Am. XVII |
| Zacatecas (Fer). | Bm. V |
| Zacatecas (Fer). | Bm V |
| Zacatecas (Cuivre). | Cm. XIV |
| Zacatecas (Plomb). | Dm. XVI |
| Zacatecas (Plomb). | Dm. XX |
| Zacatecas (Argent). | Em. IX |
| Zacatecas (Zinc). | Dm. I |
| Zaccar Rharb (Fer). | Bm. XV |
| Zaouich bou Medine (Phosphore). | Am. XI |
| Zerouala (Calcium). | Am. XVII |
| Zinaparo (Silicium). | Am. VIII |
| Zuurbult reef (Or) | Em. XIX |

## ANNEXE

### Liste des Principaux Donateurs

Les gouvernements : allemand, — américain, — argentin, — bolivien, — chilien, — français, — américain, — norwégien, — suédois.

MM.

Aguillon, — Albertini, — Amouroux, — Argys (d'), — Armas, — Asturienne (Société royale), — Aubert, — Aubry, — Auerbach, — Auzépy.

Babu, — Baillet, — Barrat, — Bel (J.-M.), — Benoist. — Benoit, — Bernard, — Billy (de), — Bischoffsheim, — Bordeaux, — Bratiano, — Brull, — Burthe.

Callens, — Carcanagues, — Carnot (Ad.), — Carnot (Ern.), — Chalon, Chancourtois (de), — Chaper, — Chapron, — Charlon, — Charrière (C$^{d}$), — Chauveau, — Chevrillon, — Coulbeaux, — Cordelier, — Coste, — Crokstone, — Crosnier, — Cumenge.

Degoutin, — Delessert (Ed.), — Deodato, — Desmanest, — Deshayes, — Domeyko, — Duchanoy, — Duhamel, — Dumas (Émilien), — Durand, — Durassier (Léon).

Eichthal (d').

Flores, — Fournel, — François, — Fuchs.

Gény, — Germain, — Gess, — Gorceix, — Groot (de), — Gruner, — Gunsburg (de).



Halphen, — Haton de la Goupillière, — Henry, — Hessel, — Husson de Foucherolles.

Javal, — Jouffroy d'Abbans (de).

Keller, — Knœrtzer, — Kramer.

Lacoste, — Lacroix, — Lagarde (Denis de), — Lamouroux, — Launay (de), — Laurium (Société française du), — Lavaur (de), — Le Chatelier, — Le Play, — Linder, — Lodin, — Longmaid.

Mackay, — Mallard, — Mazagot, — Michelin, — Michelot, — Moll (de), — Molon (de), — Montaignac (de), — Morgan (de), — Mouchet, — Mortillet (de), — Moulle.

Paillette, — Paunetrat, — Pelé, — Plantin, — Pigné (D$^{r}$), — Price (D$^{r}$ Thomas).

Raffard, — Raoul-Duval (René), — Résimont (Armand), — Retout, — Rey, — Riley, — Rivot, — Rixens, — Robellaz, — Roque.

Saladin, — Sauvage, — Sepulchre (Jean), — Simonnet, — Souhart, — Staatsbahn (I. R. P. G).

Traverso.

Varne (de), — Vieira, — Ville, — Villefosse (Héron de).

Wendel (de), — Weill, — Whitney.

Zeiller, — Zelsner (de), — Zipser.

## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE LA BAVIÈRE EN 1895.

| NATURE DES PRODUITS | QUANTITÉS | VALEURS | NOMBRE d'ouvriers |
|---|---|---|---|
| | | | |
| 1° *Mines et Salines.* | | | |
| | tonnes | francs | |
| Houille | 496.893 | 6.215.005 | 2.755 |
| Lignite | 6.422 | 55.282 | 151 |
| Minerai de fer | 3.129 | 18.944 | 23 |
| — de manganèse | 150 | 570 | 4 |
| Pyrites | 1.955 | 73.080 | 42 |
| Graphite | 3.751 | 253.060 | 198 |
| Sel gemme | 1.321 | 42.214 | 103 |
| Sel extrait par dissolution | 41.106 | 2.233.140 | 242 |
| 2° *Usines.* | | | |
| Fonte brute | 77.115 | 4 423.072 | 459 |
| Fer en barres | 48.596 | 6.840.065 | 2.339 |
| Acier | 96.829 | 11.683.449 | 525 |

(*Extrait de l'*Oesterreichische Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen.)

## PRODUCTION MINÉRALE ET MÉTALLURGIQUE DES ILES-BRITANNIQUES PENDANT L'ANNÉE 1895.

| DÉSIGNATION des SUBSTANCES EXTRAITES | QUANTITÉS | VALEUR sur les EXPLOITATIONS | PRIX moyen |
|---|---|---|---|
| 1° *Substances minérales.* | | | |
| | tonnes | francs | fr. c. |
| Houille | 192.695.944 | 1.443.371.192 | 7,49 |
| Schistes bitumineux | 2.282.815 | 14.166.477 | 6,21 |
| Pétrole | 15 | 706 | 47,07 |
| Minerai de fer | 12.817.261 | 72.273.181 | 5,64 |
| — des marais | 5.742 | 35.636 | 6,21 |
| Pyrites de fer | 9.193 | 103.755 | 11,29 |
| Minerai de plomb | 39.027 | 6.894.946 | 176,67 |
| — de zinc | 17.758 | 1.246.624 | 70,20 |
| — de cuivre | 7.651 | 552.620 | 72,23 |
| Cuivre de cément | 264 | 72.003 | 272,75 |
| Minerai d'or | 13.478 | 418.248 | 31,03 |
| — d'étain | 10.782 | 9.344.766 | 866,70 |
| — d'uranium | 41 | 52.230 | 1.273,90 |
| — de manganèse | 1.293 | 17.175 | 13,28 |
| Ocre, terre d'ombre, etc | 7.747 | 428.462 | 55,31 |
| Arsenic | 4.875 | 1.316.433 | 270,04 |
| Pyrites arsenicales | 2.998 | 70.238 | 23,43 |
| Spath-fluor | 37 | 1.362 | 36,81 |
| Plombagine | 41 | 2.522 | 61,51 |
| Gypse | 180.738 | 1.811.679 | 10,02 |
| Barytine | 21.509 | 581.548 | 27,04 |
| Sulfate de strontiane | 12.469 | 89.001 | 7,14 |
| Minerai d'aluminium (bauxite) | 10.575 | 63.201 | 5,98 |
| Schistes alumineux | 2.096 | 6.507 | 3,10 |
| Argiles | 9.952.823 | 46.394.888 | 4,66 |
| Ardoises | 591.068 | 32.133.962 | 54,36 |
| Phosphate de chaux | 508 | 22.067 | 43,44 |
| Craie | 2.971.023 | 3.880.458 | 1,30 |
| Pierres à chaux (autres que craie) | 9.677.440 | 30.396.682 | 3,14 |
| Cailloux | 96.304 | 420.190 | 4,36 |
| Granite | 1.694.400 | 13.820.535 | 8,16 |
| Gravier et sable | 1.030.709 | 2.045.518 | 1,98 |
| Grès | 4.298.214 | 34.465.551 | 8,05 |
| Quartz | 736 | 13.871 | 18,98 |
| Basalte, etc | 1.756.004 | 8.887.074 | 5,06 |
| Scories | 137.040 | 148.495 | 1,08 |
| Jais (en kilogrammes) | *76*kg | 403 | *5,30* |
| Sel | 2.208.025 | 17.899.920 | 8,11 |
| Valeur totale des substances minérales | » | 1.743.450.126 | » |
| 2° *Métaux* (*). | | | |
| Fonte | 7.826.714 | 465.671.840 | 59,50 |
| Plomb | 55.251 | 14.600.629 | 264,26 |
| Zinc | 21.264 | 8.067.561 | 379,40 |
| Cuivre | 61.727 | 72.179.850 | 1.169,34 |
| Etain | 9.750 | 16.267.485 | 1.668,46 |
| Argent (en kilogrammes) (**) | 17.613kg | 1.777.884 | 100,94 |
| Or (en kilogrammes) (**) | 256 | 583.273 | 2.278,41 |
| Valeur totale des métaux | » | 579.148.522 | » |

(*) Y compris ceux qui sont tirés de minerais importés.
(**) Y compris l'or et l'argent tirés des pyrites auro-argentifères importées, mais non compris l'or et l'argent obtenus par la fusion des autres minerais d'or et d'argent importés.



## PRODUCTION DE LA HOUILLE PAR COMTÉ.

| COMTÉS | QUANTITÉS | VALEUR sur les EXPLOITATIONS |
|---|---|---|
| **Angleterre.** | | |
| | tonnes | francs |
| Cheshire | 761.651 | 6.380.887 |
| Cumberland | 1.913.729 | 13.144.815 |
| Derbyshire | 11.476.519 | 78.341.920 |
| Durham | 31.631.385 | 201.137.117 |
| Gloucestershire | 1.283.289 | 11.680.139 |
| Lancashire | 22.366.747 | 178.047.702 |
| Leicestershire | 1.490.769 | 11.101.541 |
| Monmouthshire | 8.041.172 | 67.366.580 |
| Northumberland | 8.833.765 | 60.932.176 |
| Nottinghamshire | 6.669.897 | 49.669.731 |
| Shropshire | 709.298 | 5.942.286 |
| Somersetshire | 854.955 | 8.488.951 |
| Staffordshire | 12.734.739 | 97.952.765 |
| Warwickshire | 2.200.057 | 16.155.932 |
| Westmoreland | 1.029 | 8.297 |
| Worcestershire | 739.791 | 4.973.510 |
| Yorkshire | 23.176.015 | 184.573.982 |
| Totaux | 134.884.807 | 995.898.331 |
| **Pays de Galles.** | | |
| Breconshire | 270.505 | 2.345.410 |
| Carmarthenshire | 1.030.843 | 8.519.946 |
| Denbighshire | 2.242.305 | 17.161.933 |
| Flintshire | 651.336 | 4.985.137 |
| Glamorganshire | 24.139.847 | 218.365.932 |
| Pembrokeshire | 86.419 | 1.179.842 |
| Totaux | 28.421.225 | 252.558.200 |
| **Écosse.** | | |
| Argyle et Dumfries | 115.768 | 718.417 |
| Ayrshire | 3.725.876 | 22.350.973 |
| Clackmannan | 410.965 | 3.060.397 |
| Dumbarton | 553.175 | 3.776.140 |
| Edinburgh | 1.093.847 | 8.145.707 |
| Fife | 3.973.815 | 29.592.991 |
| Haddington | 330.833 | 2.463.666 |
| Kinross | 437 | 3.253 |
| Lanark | 16.177.536 | 102.531.481 |
| Linlithgow | 880.404 | 6.556.242 |
| Peebles | 861 | 6.406 |
| Renfrew | 52.743 | 294.569 |
| Stirling | 1.933.730 | 13.981.817 |
| Sutherland | 3.386 | 25.220 |
| Totaux | 29.253.376 | 193.506.679 |

| COMTÉS | QUANTITÉS | VALEUR sur les EXPLOITATIONS |
|---|---|---|
| **Irlande.** | tonnes | francs |
| Connaught | 7.859 | 73.138 |
| Leinster | 89.689 | 959.394 |
| Munster | 17.956 | 188.999 |
| Ulster | 12.091 | 114.574 |
| Totaux | 127.595 | 1.336.105 |
| Totaux généraux (*) | 192.687.003 | 1.443.299.315 |

(*) Ces totaux ne comprennent pas 8.941 tonnes de houille, d'une valeur de 71.877 francs, qui ont été tirées de carrières et ont été néanmoins comptées au tableau récapitulatif de la production minérale qui précède.

(*Extrait du* Mineral Statistics of the United Kingdom of Great Britain and Ireland.)



# DISCOURS

## PRONONCÉ A L'OCCASION DE LA MORT

## DE M. AMÉ-HENRY RESAL

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES MINES
MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Par M. MAURICE LÉVY, membre de l'Académie,
Inspecteur général des ponts et chaussées.

(Lu dans la séance de l'Académie des sciences du 7 septembre 1896.)

Messieurs,

Tous ceux qui s'intéressent à la mécanique en ce qu'elle a d'utile, comme en ce qu'elle a d'élevé, prendront part au deuil dont se trouve frappée l'Académie par la mort d'Henry Resal. Avec lui, en effet, s'en va le véritable continuateur de Poncelet, celui de ses disciples qui a le mieux su mettre en valeur les méthodes et les procédés du maître.

Mais Resal était lui-même un maître, et le rôle de disciple, bien qu'il ne répugnât en rien à sa modestie, n'eût suffi ni à son extraordinaire activité, ni à ses multiples et brillantes facultés. La mécanique appliquée, telle que l'entendait Poncelet, était son domaine de prédilection; mais la mécanique céleste, la physique mathématique, la cinématique pure, la géométrie lui étaient également familières, et, dans toutes ces branches de la science, il

laisse les marques d'un esprit particulièrement inventif et primesautier.

L'homme n'était pas inférieur au savant. C'était un cœur d'or et un caractère d'une inflexible droiture.

Il n'avait rien d'un apôtre. La vertu lui était trop naturelle pour qu'en la pratiquant il se crût autorisé à la prêcher. Plus volontiers, il en eût ri, comme il était disposé à rire de tout. Mais, tout en se riant, il n'a jamais manqué au plus petit de ses devoirs. Il savait les remplir tous gaiement, simplement et surtout sans phrases.

Nous savons tous combien grande était son assiduité à nos séances, et nous, ses confrères de la Section de mécanique, savons avec quel soin méthodique et scrupuleux il s'acquittait de ses devoirs de doyen, sachant très habilement, quand il le fallait, user de sa belle humeur bourguignonne pour faire accepter une grande fermeté. Mais où il a porté le plus haut le sentiment inné du devoir qui le guidait en toutes choses, c'est dans son enseignement. J'en parle savamment, ayant eu, dans ma jeunesse, l'honneur d'être, pendant plusieurs années, son répétiteur à l'École Polytechnique. Je tiens son cours pour l'un des plus fructueux qui aient jamais été professés. C'est peut-être de tous, sans même excepter celui si marquant de son éminent devancier Bour, celui qui remplit le mieux la double visée qu'on poursuit à l'École Polytechnique : visée scientifique dans le présent, visée pratique pour l'avenir. Ses exemples sont toujours choisis aux confins de la science la plus solide et de la pratique la plus moderne. Il les renouvelait sans cesse. Ses successeurs y puiseront longtemps et à pleines mains.

Les théories générales y sont condensées de main de maître, quelques-unes avec autant d'originalité que de simplicité. Je citerai notamment la dynamique des corps solides, l'hydraulique, la thermodynamique et la théorie de la transmission du travail dans les machines.



C'est un honneur pour une école d'avoir inspiré un tel enseignement, et celui qui l'a conçu méritait grandement la reconnaissance de cette école.

Ce n'est pas la forme didactique qu'il faut chercher chez Resal; elle lui était fort indifférente. Nourri de la moelle de la science, il aimait, par-dessus tout, à la servir en substance concentrée. Cette façon d'enseigner exige, de la part des auditeurs, un travail personnel, ce qui est un bien. Tous ceux qui ont voulu se livrer à ce travail se sont trouvés, par le cours de Resal, préparés à toutes les applications, si variées puissent-elles être ou devenir, de la mécanique à l'art de l'ingénieur.

Du reste, ingénieur dans l'âme, il aimait travailler pour ses collègues. « Fils d'architecte, disait-il volontiers, j'ai tenu la truelle avant de savoir tenir une plume. » Et, de fait, c'est en s'amusant à voir manier la truelle sous la direction de son père, architecte à Plombières, que, sans effort et avec un minimum de préparation au collège d'Épinal, puis à Sainte-Barbe, il est arrivé dans les premiers à l'École Polytechnique à l'âge de dix-huit ans. Pour la partie mathématique, il eût été largement prêt dès l'âge de seize ans.

C'était en 1847. Les grandes découvertes d'Ampère en électrodynamique venaient de faire leur entrée dans l'enseignement classique. Resal se prit d'enthousiasme pour elles et en fit l'objet de son premier mémoire, rédigé pendant son séjour même à l'École Polytechnique. Bravais a fait à son jeune élève le grand honneur d'en introduire une partie dans ses leçons.

Également pendant qu'il était encore élève, il fit, sur la théorie du frottement dans les engrenages coniques et la vis sans fin, une étude qui fut publiée au *Journal de l'École Polytechnique* en 1850.

Son ardeur pour la science, comme celle de ses camarades, fut un instant suspendue par la révolution de 1848.

Aux journées de juin, il servit en qualité d'aide de camp du général Mellinet.

Sorti second de l'École, il choisit la carrière des Mines. Les sciences appliquées enseignées à l'École des Mines le trouvèrent aussi assidu que les sciences mathématiques, sans d'ailleurs le détourner de ces dernières. En 1853, il fut nommé Ingénieur des Mines à Besançon, où il s'occupa de la carte géologique des régions montagneuses de la contrée. L'année suivante, il prit le grade de docteur ès sciences mathématiques.

Sa thèse est la première application faite au globe terrestre du problème de l'équilibre élastique d'une enveloppe sphérique, si magistralement résolu par Lamé. Soutenue devant Cauchy et Lamé lui-même, elle lui valut la protection de ces deux illustres savants, de même que la précocité de ses travaux d'élève lui avait valu, de la part de Poncelet, une amitié qui n'a cessé qu'avec la vie.

En 1855, Resal fut nommé professeur à la Faculté de Besançon. De cet enseignement est sortie non seulement sa *Cinématique pure*, où, entre autres innovations, on trouve la notion et la théorie de la suraccélération, mais aussi divers travaux théoriques et expérimentaux sur l'horlogerie, travaux qui, avec ceux de Phillips, ont contribué aux progrès de l'horlogerie de précision.

C'est à la même époque, en 1865, qu'il publia son *Traité de Mécanique céleste*, destiné surtout à rendre plus accessible l'œuvre de Laplace.

La mort de Delaunay, survenue d'une façon si inopinée en 1872, rendait vacante la chaire de mécanique rationnelle de l'École Polytechnique. Resal se trouvait naturellement désigné pour la remplir. J'ai dit plus haut que la succession, pour lourde qu'elle fût, n'a pas été, il s'en faut, au-dessus de ses forces.

Cette même année, il commençait la publication de son *Traité de Mécanique générale* en sept volumes, véritable



monument élevé à la mécanique rationnelle et à ses applications dans toutes les directions.

C'est là qu'on trouve résumés les mémoires les plus importants de Resal. Peu d'ouvrages sont plus nourris. L'auteur n'y prend pas toujours la peine de coordonner ses idées; il les sème un peu; mais il y en a beaucoup.

Quelque problème que l'on ait à résoudre, on peut le consulter avec fruit. Tout y est condensé. Parfois, on trouve, en quelques pages, des traits de lumière. Je citerai une Note sur le mouvement des projectiles à l'intérieur d'une arme à feu, où sont, pour la première fois, appliqués avec succès, les principes de la thermodynamique à ce phénomène complexe de la pression développée, par la combustion, dans l'âme d'une arme. On peut dire que là se trouve l'origine de la balistique intérieure contemporaine. Notre confrère Sarrau m'a dit souvent qu'il y a puisé ses premières inspirations sur ce sujet. Au surplus, à la suite de ce travail et de plusieurs autres théoriques ou expérimentaux sur le mouvement des projectiles, le ministère de la Guerre a créé, pour Resal, un poste spécial : celui d'adjoint au Comité d'artillerie pour les études scientifiques.

Son exposition concise, mais remarquablement nette de la théorie des volants et des régulateurs est certainement aussi le point de départ des travaux les plus remarquables faits, depuis, sur ce sujet délicat.

Une autre Note, insérée aux *Comptes rendus*, traite d'une façon non moins heureuse un autre sujet nouveau : celui de la propagation d'une onde liquide dans un tube élastique, question qui trouve son application dans les phénomènes de la circulation du sang et dans les expériences de notre confrère Marey.

Outre ces travaux d'inspiration primesautière et de plein succès, ce vaste ouvrage contient une foule d'applications utiles ou d'exercices intéressants.

En 1873, l'Académie des Sciences ouvrit ses portes à Resal, en lui donnant la succession du baron Dupin. Cette haute distinction n'a fait que surexciter son ardeur au travail. Ses communications à l'Académie ou aux *Annales des Mines* montrent que son activité ne s'est jamais ralentie. Resal avait deux qualités rarement unies : il travaillait avec une merveilleuse facilité et il travaillait toujours. Le travail était sa seule distraction quand il était bien portant, son seul remède, remède dangereux, quand sa robuste santé a commencé à le trahir.

En 1888, il a publié un *Traité de physique mathématique* qui a pour objet de résumer cette vaste science, comme il avait précédemment résumé la mécanique céleste.

Il travaillait à la seconde édition de la *Mécanique générale*, dont les deux premiers volumes ont paru, quand la mort est venue le surprendre.

Depuis plusieurs années, sa santé déclinait visiblement. La maladie qui a fini par l'emporter avait légèrement courbé ce corps autrefois droit et élancé comme les grands chênes des forêts des Vosges, au milieu desquelles s'est passée son enfance ; elle avait pâli et quelque peu attristé ce fin visage qu'on était habitué à voir toujours animé et souriant. Mais rien ne faisait présager une fin prochaine, lorsque, comme tous les ans, il est parti pour aller passer ses vacances en Suisse et en Savoie. Le 29 juin, il m'adressait encore de Saint-Gervais une lettre dans laquelle il me communiquait diverses observations sur un mémoire que l'Académie pourrait être appelée à juger. Cette lettre me montrait qu'il avait toujours l'esprit en éveil et le souci des jugements à rendre par l'Académie.

Vers le milieu du mois d'août, il fut pris d'une violente crise d'atonie intestinale ; sa famille accourut près de lui. Les soins qui lui furent prodigués l'avaient remis assez bien pour qu'il manifestât le désir d'aller visiter l'Exposition de



Genève. Mais en route, à Annemasse, il fut repris avec une violence telle qu'une opération chirurgicale fut jugée nécessaire. Il succomba peu de jours après, le 22 août. Il a été inhumé, le 25 août, à Étang-sur-Arroux (Saône-et-Loire), lieu de sépulture de famille.

C'est dans ce coin de la Bourgogne qu'il comptait se retirer dans deux ans, lorsqu'il aurait eu droit à sa retraite comme Inspecteur général des Mines. Au lieu du repos bien mérité et qui n'eût pas été l'oisiveté, qu'il y espérait, c'est le repos suprême qu'il y dort à présent. Mais il laisse après lui une œuvre que je n'ai pu qu'esquisser ici à grands traits et qui assure la survivance de son nom.

Il laisse à ses deux fils le plus précieux de tous les héritages : l'exemple d'une vie consacrée tout entière aux progrès de la science et à ses applications en ce qu'elles ont de plus noble et de plus désintéressé. Cet exemple n'a pas été perdu pour eux, et Resal a eu la joie bien rare de les voir tous deux sortir brillamment de l'École Polytechnique, dans la carrière des Ponts et Chaussées, qu'ils parcourent de façon à ajouter encore à la réputation du nom qu'ils portent.

Ces deux fils sont la couronne et la parure d'une mère qui, grâce à des dons exceptionnels, a pu les suivre, non seulement dans leur éducation classique, mais même fort loin dans leur instruction scientifique. Ils seront aussi sa consolation dans la cruelle épreuve qu'elle subit et dans laquelle l'accompagnent les respectueuses sympathies de l'Académie, du monde savant et des ingénieurs.

# BULLETIN
## DES ACCIDENTS D'APPAREILS A VAPEUR
### SURVENUS PENDANT L'ANNÉE 1895.

(Résumé résultant de l'étude des dossiers administratifs.)

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 janvier. | Usine d'électricité, à Paris. | Chaudière à petits éléments, système Belleville, de 80 mètres carrés de surface de chauffe, timbrée à 15 kg.; tubes de 10 centimètres de diamètre. L'arrivée de l'eau dans le collecteur rectangulaire inférieur se faisait par la gauche. La fermeture de la porte de boîte à tubes était assurée par une barre transversale ; le fourneau portait des trappes d'expansion, et la prise de vapeur, un clapet automatique. Le nettoyage avait laissé à désirer. | Surchauffe intense limitée à un tube de la cinquième rangée de l'élément situé le plus à droite, et ouverture en plein métal suivant le faciès ordinaire (Pl. XI, *fig.* 1), en dehors de la soudure, dans une partie pailleuse. Les portes de devanture restèrent closes, les trappes d'expansion fonctionnèrent et ce fut par elles que la vapeur s'échappa. Le fonctionnement du clapet d'arrêt de vapeur permit de maintenir les autres chaudières de l'usine en marche régulière. | Néant. | Surchauffe locale, devant vraisemblablement être rapportée à un mauvais état de nettoyage du tube, qui était d'ailleurs pailleux, et peut-être à un excès du taux de vaporisation de la chaudière par rapport aux conditions de circulation de l'eau dans son élément de droite. |
| 9 janvier. | Bateau remorqueur sur la Seine, à Port-Villez (Seine-et-Oise). | Chaudière à petits éléments, système Oriolle, de 150 mètres carrés de surface de chauffe, timbrée à 12 kg. ; les tubes avaient, les uns 6, les autres 7 centimètres de diamètre. Seize tubes inférieurs, trop rapprochés des grilles du foyer, avaient été supprimés, et les trous correspondants dans les plaques tubulaires d'avant et d'arrière avaient été tamponnés au moyen de tampons de fer en forme de dés à coudre, assujettis dans les plaques par sertissage au dudgeon et bagués au moyen de bagues d'acier. La disposition de ces tampons ne donnait pas de garantie et laissait la résistance de l'assemblage à la merci d'une malfaçon. Le travail avait été suivi d'épreuve. | Au cours du service habituel de la chaudière, départ violent d'un des tampons dudgeonnés. La chaudière se vida dans le foyer ; les portes de foyer tinrent bon, mais le flux de vapeur, d'eau et de gaz du foyer, traversant la grille et le cendrier, envahit la chaufferie. Il a été constaté après l'accident que le dudgeonnage avait été mal fait ; il n'avait pas produit d'épaulement du côté où un épaulement eût été nécessaire pour s'opposer à la sortie du tampon (Pl. XI, *fig.* 2). | Le chauffeur et le mécanicien brûlés : l'un mortellement, l'autre d'une manière grave. | Manière vicieuse dont avait été tamponné un trou de plaque à tubes. Le sertissage du tampon était défectueux : sa forme et la disposition générale adoptée prêtaient à un accident de ce genre. |
| 16 janv. | Papeterie, à Cugand (Vendée). | Tambour sécheur en fonte, de $2^m,5$ de diamètre et $2^m,2$ de longueur, comprenant un cylindre de 24 millimètres d'épaisseur, et deux fonds emboîtés sans jeu dans les extrémités du cylindre et assemblés au moyen de boulons sur deux brides circulaires, venues de fonte intérieurement à celui-ci. Les fonds étaient reliés l'un à l'autre par six tirants en fer. La vapeur arrivait dans l'appareil par une tuyauterie portant une soupape réglée pour $2^{kg},4$ ; l'eau de condensation était relevée lors de la rotation du tambour par une écope intérieure et versée à un purgeur automatique. Sur la surface du cylindre, passaient des feuilles de papier humide qui s'étendaient jusqu'au voisinage de ses extrémités. | Rupture circulaire du cylindre, près de la bride portant l'un des fonds (la figure 3, Pl. XI, donne une vue perspective d'une partie de la section de rupture), c'est-à-dire suivant une ligne que la forme de la pièce avait exposée aux inconvénients du retrait de la fonte lors de la coulée, et qui se trouvait sujette à des inégalités de dilatation et à des efforts de flexion lors des échauffements et refroidissements des diverses parties de l'appareil. C'est ainsi déjà que s'était brisé, le 28 septembre 1893, à Bousbecque (Nord), un tambour de même constitution et de même origine. Une troisième explosion, offrant les mêmes caractères, est encore survenue depuis lors à Conty (Somme), le 7 avril 1896. | Deux ouvriers tués. | L'accident doit être rapporté avant tout à la constitution générale de l'appareil. |
| 21 janv. | Usine de blanchiment et apprêts, à Courbevoie (Seine). | Tambour sécheur de 45 centimètres de diamètre et 1 mètre de longueur, formé d'une virole de cuivre assemblée à ses extrémités avec deux plateaux en fonte. Ces plateaux étaient sans nervures et de forme plane, à cela près qu'ils présentaient dans la partie centrale un léger bombement vers l'extérieur et une augmentation de l'épaisseur qui, de $9^{mm},5$, passait par un ressaut à 12 millimètres. (Pl. XI, *fig.* 4). Age ancien et inconnu. Timbre, 3 kg. | Rupture d'un des plateaux terminaux suivant le pourtour circulaire de la surépaisseur centrale, et suivant des lignes radiales (Pl. XI, *fig.* 5). La rupture circulaire montrait, sur une partie de sa longueur, la teinte d'une cassure préexistante, et la face extérieure du fond portait le long de cette ligne de cassure une bande oxydée indiquant une fuite ancienne. | Néant. | Cassure préexistante, qui affectait un fond de forme défectueuse et d'âge ancien, et qui était accusée sur la face externe de ce fond par une trace d'oxyde. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 26 janv. | Usine d'électricité, à Paris. | Chaudière à petits éléments, système Belleville, appartenant à la même batterie et comportant la même description que celle dont un tube bouilleur s'était ouvert le 2 janvier. Les tubes étaient propres. | Surchauffe des quatre rangées inférieures de l'élément situé le plus à droite, et ouverture du tube de droite de la troisième rangée, suivant le faciès ordinaire (Pl. XI, *fig.* 6). Il y avait aussi des teintes bleues à la hauteur des quatrième et cinquième rangées sur les tubes de l'élément voisin. Comme le 2 janvier, la rupture a été inoffensive, les portes de boite à tubes et de foyer restant closes, et les trappes d'expansion se soulevant pour livrer passage à la vapeur. | Néant. | Surchauffe dont la cause, attribuable soit à une insuffisance d'alimentation, soit à un excès de chauffage, n'a pu être déterminée avec certitude. |
| 8 février. | Tréfilerie, à Joinville-le-Pont (Seine). | Chaudière horizontale à deux corps cylindriques superposés, le corps inférieur contenant un foyer intérieur et un retour de flamme tubulaire amovibles (Pl. XI, *fig.* 7). Les gaz chauds, après avoir parcouru les tubes de ce retour, chauffaient extérieurement les corps cylindriques. Surface de chauffe, 120 mètres carrés ; timbre, 7 kg. ; construction en 1891. Le corps inférieur, de 1m,7 de diamètre, était terminé à l'arrière par un fond en tôle de 12 millimètres, embouti suivant la forme d'une calotte sphérique dont le rayon atteignait 2m,4, avec congé périphérique n'ayant que 25 millimètres de rayon. La boite de retour de flamme ne laissait entre elle et ce corps qu'un intervalle de 5 centimètres. L'alimentation débouchait dans la région basse arrière, juste au-dessus de la clouure circulaire d'attache du fond embouti. | Le fond embouti du corps inférieur s'est rompu circulairement tout le long du congé de son pourtour. Cette ligne était affaiblie dans sa partie basse, sur un tiers de la circonférence, par des sillons de corrosion intérieurs, auxquels s'ajoutaient par places des corrosions extérieures causées, au contact des gaz chauds, par des fuites à la rivure circulaire. En un point, qui a paru être celui de l'amincissement maximum, l'épaisseur de la tôle était réduite à 2 millim. 1/2 (Pl. XI, *fig.* 8).<br>Tandis que le fond détaché était projeté, la chaudière est partie en sens inverse, et dans son mouvement qui peut avoir été prolongé, comme celui d'une fusée, par l'écoulement progressif de la vapeur et de l'eau entre le corps cylindrique et la boite de retour de flamme, elle est allée démolir la maison du concierge, ainsi que l'écurie voisine, et endommager [illegible] des bureaux. | Quatre morts, trois personnes grièvement blessées, et dégâts matériels considérables. Il aurait pu y avoir beaucoup plus de victimes, si l'accident n'était survenu à l'heure du déjeuner des ouvriers. | Corrosions tant intérieures qu'extérieures, qui avaient affaibli le pourtour du fond embouti du corps cylindrique principal. Les corrosions intérieures s'étaient développées, au voisinage du débouché de l'eau d'alimentation, à la faveur des mouvements de soufflet de ce fond, accentués par l'insuffisance de son bombement et de son épaisseur ; les corrosions extérieures avaient été le résultat de la condensation des fumées acides sur une partie de la chaudière relativement froide et rendue humide par des suintements à la clouure circulaire d'attache du fond embouti. La disposition défectueuse de la capacité où se faisait l'alimentation, au mauvais commu- [illegible] pareil, avait favorisées di- vers phénomènes. Des visites intérieures et extérieures soigneusement passées eussent été de nature à faire apercevoir en temps utile de la détérioration de l'appareil. |
| 11 février | Usine d'impression sur étoffes, teinture et gaufrage, à Caluire-et-Cuire (Rhône) | Tambour de 1m,09 de diamètre, 1 mètre de longueur environ (capacité 1m3,026), en tôle de fer de 6 millimètres, fermé à ses extrémités par deux fonds ne présentant qu'une flèche de 35 millimètres et réunis à la partie cylindrique au moyen de cornières d'épaisseur irrégulière (Pl. XI, *fig.* 9). Ce tambour, d'âge ancien et inconnu, ne recevait autrefois que de la vapeur détendue, provenant d'une machine à imprimer. On l'avait installé, la veille de l'accident, sans l'éprouver ni le déclarer, comme premier cylindre d'une machine à sécher. La vapeur arrivait, par une conduite qui était, à la vérité, de grande longueur, d'une chaudière timbrée à 7 kg. ; au sortir de la machine, elle était dirigée dans des tuyaux de chauffage de 45 mètres de développement, terminés par un dégagement vertical débouchant au-dessus d'un toit. | Lors d'une reprise du travail de l'usine, et aussitôt après l'ouverture de la valve d'admission de vapeur sur la machine à sécher, détachement d'un des fonds, par rupture en partie dans l'angle des ailes de la cornière, en partie dans la tôle du fond suivant sa rivure avec la cornière (Pl. XI, *fig.* 10). | Pas d'accident notable de personnes : deux ouvriers ont reçu des contusions insignifiantes. | Ce récipient d'âge ancien, dont les fonds insuffisamment bombés étaient assemblés à la partie cylindrique par cornières, et par des cornières en partie rongées par la corrosion, était hors d'état de supporter les pressions dont il était exempt dans sa destination primitive, et auxquelles les conditions de sa nouvelle installation l'exposaient. |
| 6 mars. | Fabrique de cellulose, à Novillars (Doubs). | Tambours sécheurs en fonte, de 1m,5 de diamètre et un peu plus de longueur, 2m3,570 de capacité, timbrés à 3 kg. Les fonds étaient assemblés sur des brides circulaires intérieures, venues de fonte aux extrémités de chaque cylindre (Pl. XI, *fig.* 11). Ces récipients, au nombre de 12, avaient été fondus en 1888. La vapeur, fournie par des générateurs Belleville, traversait des détendeurs qui ramenaient sa pression à 6 kg. ; une vanne d'arrêt, placée au-delà, était en mauvais état ; puis venait une soupape, chargée pour un peu plus de 3 kg. | Explosion de trois des tambours, survenue alors que le travail de l'atelier était interrompu depuis une heure et demie ; la vanne d'arrêt devait être dans la position de fermeture, mais laissait passer la vapeur par suite de son état. Il a été constaté que l'un des cylindres rompus avait des retirures de fonte à la base de sa bride circulaire ; en plusieurs points, l'épaisseur du métal, qui devait être de 30 millimètres, se trouvait, par suite des vides, réduite à 4 ou 5 millimètres (Pl. XI, *fig.* 12). | Un homme tué, cinq blessés plus ou moins grièvement. | L'explosion a eu pour cause essentielle un défaut de fabrication de l'un des cylindres, affaibli par des retirures de la fonte à l'embase de sa bride circulaire intérieure. Il a pu se joindre à la cause ci-dessus, comme cause accessoire, un certain excès de pression, produit par le mauvais état des vannes et favorisé par un léger excès de charge de la soupape de sûreté. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 9 mars. | Minoterie, à Rouen (Seine-Inférieure). | Chaudière horizontale semi-tubulaire, de 58 mètres carrés de surface de chauffe, cubant 13m3,7 et timbrée à 6 kg. Les tubes à fumée, disposés, au nombre de 18, en trois rangées horizontales, étaient en laiton et mesuraient 0m,12 de diamètre extérieur, 5m,15 de longueur, 3 millimètres d'épaisseur primitive. Construite en 1873, la chaudière avait été réparée à diverses reprises : le tube qui s'est écrasé datait soit de la construction primitive, soit de 1877 ; il avait été raboute, ainsi que tous les autres, en février 1895. Son raboutage portait sur 0m,20 de longueur, à son extrémité arrière (côté de l'entrée des gaz chauds). La chambre de chauffe était une fosse profonde, formant, avec la cave à charbon contiguë, un ensemble de locaux peu aérés, n'ayant pour issue qu'une échelle de meunier. | Le chauffeur s'était mis en devoir de vidanger la chaudière sous pression, lorsqu'un tube de la rangée du milieu se brisa sur une longueur de 0m,85, commençant à 15 millimètres de la partie raboutée. Les épaisseurs relevées, tant sur les bords de la partie restante que sur les fragments retrouvés, variaient de 1 1/2 à 2 millimètres et atteignaient en un seul point 2 millimètres 1/2.<br>La porte de la boîte à fumée, convenablement loquetée, ne s'ouvrit pas ; mais la porte du foyer était simplement battante sans fermeture, le cendrier avait son ouverture béante, et le flux brûlant qui se répandit dans la chaufferie ne permit qu'au bout d'une demi-heure de secourir le chauffeur, qu'on trouva tombé contre un tas de charbon. | Le chauffeur mortellement brûlé. | Affaiblissement d'un tube à fumée en laiton de 0m,12 de diamètre, exagérément affaibli par l'usure. Les circonstances auxquelles il y a lieu de rapporter la gravité des conséquences de l'écrasement de ce tube sont, outre le grand diamètre de celui-ci, l'absence de tout loquet ou verrou aux portes du foyer, et les dispositions très défectueuses de la chambre de chauffe et des locaux voisins sous le rapport de l'aération et des issues. |
| 18 mars. | Papeterie, à Ponts-et-Marais (Seine-Inférieure). | Chaudière horizontale à deux bouilleurs, offrant 28 mètres carrés de surface de chauffe, cubant 12 mètres cubes et timbrée à 5 kg. — L'alimentation débouchait dans le bouilleur de droite. Le seul appareil indicateur du niveau de l'eau était un tube de verre. Un flotteur, qui avait constitué le second appareil réglementaire, avait été récemment enlevé. | Ouverture de la tôle de coup de feu du bouilleur de gauche, sur 85 centimètres de longueur : cette tôle offrait la coloration bleue de l'oxyde des battitures ; il n'y a pas eu d'eau répandue. Le tube de verre était bouché à sa base par une obstruction de 5 millimètres de hauteur, laissant libre au-dessous d'elle la communication entre le robinet de prise d'eau et le robinet purgeur. | Faibles dégâts matériels seulement. | Surchauffe consécutive à un manque d'eau ; ce manque d'eau a lui-même été la conséquence de l'obstruction du tube indicateur en verre et de l'absence du second appareil indicateur du niveau de l'eau. |
| | de Narbonne. (Réseau des chemins de fer du Midi.) | [illegible] de capacité, timbrée à 7 kg., et datant de 1882, ainsi que dix-neuf autres pareilles. Le haut de l'enveloppe du foyer était formé d'une tôle cylindrique en berceau, prolongeant vers l'arrière la partie supérieure du corps cylindrique, et assemblée par des rivures circulaires simples, à l'avant à ce corps cylindrique, à l'arrière au bord embouti de la plaque d'arrière de l'enveloppe du foyer ; à droite et à gauche, les bords rectilignes de cette tôle étaient assemblés, par des rivures longitudinales doubles, à des pièces en fer servant de supports aux fermes du foyer. Cette tôle mesurait 1m,95 de longueur d'avant en arrière, 1m,28 de développement dans le sens perpendiculaire, 13 millimètres d'épaisseur. Aux essais de traction qui ont suivi l'accident, elle n'a donné, en moyenne, que 33kg,5 de résistance à la rupture en long et 24kg,7 en travers avec allongements moyens respectifs de 7,4 et 5,5 p. 100 ; propriétés bien différentes de celles auxquelles on devait s'attendre d'après le cahier des Charges et les essais de recette. | [illegible] formant le berceau de l'enveloppe du foyer ; la rupture initiale s'est faite du côté droit, le long de l'assemblage réunissant la tôle du berceau au support de fermes (Pl. XI, *fig.* 13). Il a été constaté que, suivant la ligne de matage intérieur du support de fermes contre la tôle du berceau, une fissure fine et profonde s'était développée dans cette dernière. Une fissure de même nature, mais moins avancée dans son développement, existait le long du matage symétrique, au côté gauche de la chaudière. Les vingt chaudières de la série avaient toutes, à des degrés divers, des fissurations de même espèce ; sur toutes, les tôles des berceaux ont été changées à la suite de cet accident. | [illegible] plus de vingt jours d'incapacité de travail. Dégâts matériels par suite de la projection de la sablière, de la colonnette de prise de vapeur, etc. | [illegible] le long d'une ligne de flexion. |
| 4 avril. | Distillerie, à Marseillan (Hérault) | Chaudière horizontale à deux corps à flammes renversées ; capacité, 10 mètres cubes ; timbre, 5 kg. Le corps inférieur ou réchauffeur mesurait 82 centimètres de diamètre et 7 mètres de long. Cet appareil, vieux de plus de 30 ans, et alimenté par des eaux qui contenaient par litre 0gr,686 de chlorure de calcium et 0gr,895 de chlorure de magnésium, était profondément corrodé à l'intérieur et à l'extérieur, et avait présenté à plusieurs reprises des fuites qu'on s'était contenté d'aveugler par la pose de contrepièces. | Déchirure du réchauffeur, suivant des lignes où les corrosions étaient telles qu'on y a relevé, en deux points, l'épaisseur de 8 dixièmes de millimètre (Pl. XI, *fig.* 14). | Néant. | Corrosions profondes, extérieures et surtout intérieures, qui avaient affaibli à l'excès le corps inférieur ou réchauffeur de ce générateur d'âge très ancien. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 avril | Usine métallurgique, à Pamiers (Ariège). | Chaudière du type locomotive, de 67 mètres carrés de surface de chauffe, cubant 4m3,226, et timbrée à 5kg,5. Les tubes à fumée, au nombre de 51, mesurant 9 centimètres de diamètre et 4m,23 de longueur, étaient en laiton étiré sans soudure, de 3 millimètres d'épaisseur à l'état neuf, et bagués. Le générateur était placé à la suite d'un four à réchauffer, dont les gaz chauds aboutissaient de bas en haut dans son foyer. | Fissuration d'un tube à fumée (ou peut-être de deux tubes à fumée simultanément) sur quelques centimètres de longueur à partir de la bague, côté du foyer. Ces tubes étaient, dans cette région, fortement amincis par l'usure. L'échappement de vapeur et d'eau a produit un refoulement de gaz et de combustible par le gueulard du four à réchauffer, frappant l'ouvrier qui travaillait à ce gueulard. | Un ouvrier brûlé grièvement. | Usure du tube qui s'est rompu. La gravité des conséquences de la rupture est attribuable notamment à ce que cette chaudière tubulaire fait suite à un four métallurgique; un pareil four ne pouvant avoir ses ouvertures fermées en permanence, il importe particulièrement qu'une chaudière lui faisant suite n'éprouve pas d'avarie donnant issue à un échappement de vapeur et d'eau. |
| 6 mai. | Moulin, à Chocques (Pas-de-Calais). | Chaudière à foyer intérieur, tubulaire à flamme directe, composée d'un corps vertical contenant le foyer et d'un corps horizontal contenant les tubes. Surface de chauffe, 8 mètres carrés. Volume, 1m3,430. Timbre, 5 kg. La chaudière, d'âge et d'origine inconnus, portait à la base du corps vertical des corrosions profondes, qui avaient réduit la tôle de 12 à 2 ou 3 millimètres et même en un point avaient produit une perforation ; mais l'étanchéité était maintenue par du mastic qui avait été coulé sur 5 centimètres de hauteur au bas de l'intervalle compris entre le corps vertical et le foyer. Cet appareil en déplorable état avait résisté en 1894 à l'épreuve hydraulique, ce mode de vérification étant, comme on sait, impuissant par lui-même à garantir contre le danger des corrosions : c'est l'observa- [illegible] 1880 qui doit prémunir contre cette classe de dangers. | On mettait la chaudière en service après un long chômage, la pression venait d'atteindre 3 kg., et la machine d'être mise en mouvement, lorsque le corps vertical se rompit circulairement à sa partie inférieure suivant une ligne passant par la porte du foyer, les autoclaves, et partiellement par les rivures de la base (Pl. XI, *fig.* 15) ; la partie située au-dessus de cette ligne de séparation se développa et fut projetée au loin. Le corps horizontal se divisa lui-même en deux parties suivant ses rivures horizontales, tandis que le faisceau tubulaire restait en place. | L'ouvrier qui conduisait l'appareil a été coupé en deux, et deux jeunes gens de 16 et 13 ans, qui le regardaient travailler, ont eu la tête fracassée. | Très mauvais état de cet appareil d'âge inconnu, affaibli par des corrosions profondes qui réduisaient la tôle à une épaisseur minime au bas du corps cylindrique vertical. Une visite faite conformément à l'article 36 du décret du 30 avril 1880 n'aurait pas laissé ces corrosions inaperçues. |
| 15 mai. | Fonderie de graisses, à Villejuif (Seine). | Double fond de bassine à cuire : dans le vase intérieur, en cuivre, de 1m,3 de diamètre, étaient les matières à élaborer ; ce vase pénétrait de 90 centimètres dans une cuve cylindrique en fer de 1m.36 de diamètre et 1m,3 de profondeur ; les deux vases, assemblés par cornière au pourtour supérieur de la cuve en fer, laissaient entre eux un double fond de 628 litres, contenant de l'eau, et chauffé extérieurement sur 4m2,65. Le double fond, timbré à 1 kg., portait deux soupapes à ressort à charge directe, entièrement paralysées par le vissage à fond de leurs chapeaux. Les dispositions du fourneau ne comportaient aucun moyen de régler le tirage. La cornière d'assemblage présentait des corrosions. | Les ouvriers s'étaient absentés pour leur repas, laissant une opération continuer d'elle-même. Pendant leur absence, rupture de la cornière d'assemblage et projection du vase intérieur, qui passa au travers de la toiture et alla retomber à 20 mètres de distance. Une portion de mur, représentant 8 ou 10 mètres cubes de maçonnerie, fut démolie. | Simples dégâts matériels. | L'explosion a eu pour cause probable un excès de pression, produit, à la faveur du calage des soupapes, sur un appareil abandonné à lui-même et d'ailleurs affaibli par des corrosions. |
| 5 juin. | Mine de houille, à la Vernarède (Gard). | Chaudière cylindrique horizontale à fonds hémisphériques, de 1m,3 de diamètre et 15m,9 de longueur totale ; surface de chauffe, 32 mètres carrés ; volume, 21 mètres cubes ; timbre, 5 kg. Cet appareil et deux autres semblables, d'âge inconnu et certainement très ancien, étaient installés souterrainement, pour le service d'un puits entièrement intérieur aux travaux du fond (Pl. XII, *fig.* 1 et 2). Leur massif commun s'étendait sur toute la largeur et jusqu'au fond du local voûté qui les contenait ; deux des trois chaudières étaient constamment en service, pendant qu'on procédait au nettoyage et éventuellement aux réparations de la troisième. Ces générateurs étaient alimentés avec des eaux de mine, contenant des sulfates de soude, de magnésie, etc. | La chaudière s'est violemment divisée en trois parties principales qui ont été diversement projetées. Les ruptures initiales et caractéristiques affectaient l'une des tôles de la deuxième virole à partir de l'avant (Pl. XII, *fig.* 3, 4 et 5). Cette tôle s'est fragmentée et déchirée notamment suivant deux génératrices voisines de ses rivures d'attache avec les tôles adjacentes. On n'en a retrouvé qu'un lambeau, à contour très tourmenté, représentant la moitié de sa surface. C'était une tôle qui avait été mise en place lors d'une réparation : elle n'avait eu que 8 millimètres d'épaisseur originelle, tandis que les tôles de la construction primitive mesuraient 11 millimètres, et elle était profondément amincie par corrosion intérieure : on a constaté sur la partie restante, le long d'une des lignes de déchirure longitudinale, des épaisseurs de 1,5 à 2 millimètres sur 30 centimètres de longueur. | Les hommes qui se trouvaient aux chaudières, à la machine, aux molettes et à la recette du puits ont *tous* été soit tués sur le coup, soit brûlés mortellement : au total, neuf personnes ont péri. | Corrosion intérieure profonde, affectant l'une des tôles de réparation d'un générateur d'âge très ancien, dont l'inspection intérieure était rendue pénible par la température élevée du massif, dont les réparations avaient été faites en tôle d'épaisseur inférieure à celle de la construction primitive et dont les conditions d'emplacement ont rendu la rupture particulièrement désastreuse. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 juin. | Bateau de pêche du port d'Etaples (Pas-de-Calais). | Chaudière alimentant un cabestan pour la manœuvre des engins de pêche. Cet appareil, du type vertical, à foyer intérieur, avec bouilleur horizontal traversant le foyer, avait été construit et timbré à 6 kg., en 1889, puis acheté d'occasion en 1894 par l'armateur du bateau et installé à bord sans nouvelle épreuve. Sa cheminée intérieure, de 20 centimètres de diamètre et 56 centimètres de hauteur, était corrodée au-dessus du niveau de l'eau ; la partie altérée n'avait plus que de 1,8 à 3 millimètres d'épaisseur. | Déchirure qui a troué la cheminée intérieure, sur 15 centimètres de hauteur et 18 centimètres de largeur, à 6 centimètres au-dessus du niveau normal de l'eau. La chaudière a été soulevée et renversée, pendant que la partie supérieure de la cheminée était projetée en l'air hors de la chambre de machine. Il paraît que, lors de l'explosion, la porte du foyer était ouverte et le chauffeur assis devant : les dimensions exiguës du local ne permettaient pas de s'y tenir debout. | Le chauffeur a été brûlé mortellement ; un mousse et le patron du bateau ont été brûlés aussi, l'un grièvement, l'autre sans gravité. | Mauvais état de la cheminée intérieure de la chaudière, profondément corrodée par l'action des températures élevées auxquelles elle était exposée. Les dispositions de l'appareil prêtaient à une corrosion de ce genre, qu'un examen convenable, effectué conformément à l'article 48 du décret du 1er février 1893, aurait permis d'apercevoir en temps utile. |
| 5 juillet. | Moulin, à Saint-Denis-la-Chevasse (Vendée). | Chaudière à foyer intérieur, tubulaire à flamme directe, composée d'un corps vertical contenant le foyer et d'un corps horizontal contenant les tubes. Le foyer mesurait 65 centimètres de diamètre et 70 centimètres de hauteur ; les épaisseurs primitives de ses parois étaient 12 millimètres pour la plaque tubulaire et 10 millimètres pour le reste. Surface de chauffe, 6m2,48 ; capacité, 754 litres ; timbre, 6 kg. ; construction en 1872. Le foyer s'était affaibli par l'usure et des contreplaques y avaient été posées pour aveugler des fuites, l'une, dans la partie de droite de la plaque tubulaire, l'autre, au bas de la paroi cylindrique, côté gauche. Cette seconde contreplaque avait été mise récemment ; elle était tenue par des prisonniers, avec joint au minium ; sa pose était l'œuvre d'un serrurier de la localité. La chaudière était conduite par un enfant de moins de seize ans, et le propriétaire avait paralysé, au moins partiellement, les soupapes au moyen de cales. | Le foyer s'est déchiré, l'appareil a été tout entier projeté en l'air, et, crevant la voûte du local où il se trouvait, est allé tomber dans un étang à 15 mètres de distance. La déchirure partait de la rivure gauche du gueulard, passait par les trous des prisonniers de la contreplaque récemment posée, puis allait se continuer dans la plaque tubulaire ; la paroi ainsi découpée s'étant violemment repliée vers l'intérieur du foyer, laissait béant un trou de plusieurs décimètres carrés. On a relevé, le long de la déchirure, des épaisseurs de 6, de 5 et de 4 millimètres. On observait aussi, après l'explosion, que le ciel du foyer était affaissé de manière à présenter, en sens inverse de sa courbure primitive, une convexité de 95 millimètres de flèche ; cette avarie pouvait être le résultat d'un manque d'eau antérieur. Le manomètre n'a pas été retrouvé. | L'enfant auquel avait été confiée la conduite de la chaudière a été mortellement brûlé. | Vaste déchirure de la partie gauche du foyer, qui était affaiblie par l'usure, et où une fuite avait été récemment masquée au moyen de la pose d'une contrepièce, par les soins d'un serrurier, d'une façon vicieuse et susceptible d'aggraver cet affaiblissement. La déchirure s'explique comme résultat immédiat de l'affaiblissement en question, combiné ou non avec un excès de pression. |
| 13 juillet. | Grue roulante, à Rochefort (Charente-Inférieure). | Chaudière verticale à foyer intérieur, tubulaire à flamme directe. Surface de chauffe, 9 mètres carrés ; capacité, 613 litres ; timbre, 7 kg. ; construction en 1878. La tôle du foyer, de 10 millimètres d'épaisseur primitive, était affaiblie au voisinage du débouché de l'alimentation, par une corrosion étendue, tant extérieure qu'intérieure, qui en avait réduit l'épaisseur à 5mm,3 en moyenne, et en un point à 4mm,8 ; de plus, cette tôle paraît avoir été aigre. On avait l'habitude de laisser l'appareil en pression sous petit feu pendant le déjeuner des ouvriers, qui avait lieu dans une cabane à 50 mètres de distance. Le matin du jour de l'accident, on avait fourni au chauffeur, au lieu de menu de qualité inférieure qu'il était accoutumé à brûler, du charbon anglais à longue flamme. | Pendant le déjeuner des ouvriers, un douanier, voyant un échappement de vapeur par les soupapes (ou par l'une d'elles), vint regarder le manomètre, vit que l'aiguille avait franchi le trait rouge (7 kg.) et s'était butée en regard du chiffre 8, dernier de la graduation, qu'elle ne pouvait franchir. Il donna l'alarme, et le chauffeur arrivait sur la plate-forme de la grue, lorsque la chaudière sauta en l'air et alla retomber à 40 mètres de distance. La région amincie de la paroi du foyer s'était fragmentée en quatre morceaux (Pl. XII, *fig.* 6) et le foyer, affaissé sur lui-même, présentait un trou équivalant à plus d'un tiers de sa surface. | Le chauffeur tué sur le coup. | Excès de pression, combinant ses effets avec la diminution de résistance due à une corrosion du foyer. |
| 19 juillet. | Lavoir, à Paris. | Chaudière Field de 9 mètres carrés de surface de chauffe, 1 mètre cube de capacité, timbrée à 6 kg. Parmi les 38 tubes pendentifs, de 53 millimètres de diamètre intérieur, quatre étaient démunis du tube intérieur destiné à assurer la circulation ; dans d'autres, le tube de circulation touchait le fond du tube bouilleur, où s'étaient accumulés des dépôts boueux. | L'un des tubes pendentifs privés de tube intérieur s'est ouvert à son extrémité inférieure ; ce tube était notablement aminci, dans sa partie basse, par corrosion extérieure, et son extrémité portait (probablement depuis une avarie antérieure) un fond plat rapporté par soudure : c'est ce fond rapporté qui s'est décollé sous l'influence de la surchauffe. | Le chauffeur brûlé, non grièvement. | Surchauffe du tube, qui était privé de son tube intérieur de circulation, et ne pouvait par suite que s'encombrer de dépôts à sa partie inférieure. De plus, les nettoyages de la chaudière laissaient à désirer. Le tube qui s'est rompu était d'autant moins en état de résister, qu'il portait un fond rapporté par soudure et qu'il était aminci par une corrosion extérieure, attribuable aux effets antérieurs de surchauffe auxquels il avait été exposé par suite des mêmes circonstances. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 21 juillet. | Distillerie, à Remy (Oise). | Réchauffeur tubulaire de vinasse, comprenant un faisceau de 190 tubes dans lesquels passait la vinasse à réchauffer, tandis que ces tubes étaient extérieurement chauffés par de la vapeur comprise entre eux et une enveloppe cylindrique de 1 mètre de diamètre et 1m 25 de hauteur. Les tubes se terminaient en haut et en bas dans deux plaques tubulaires, au pourtour desquelles venait s'assembler l'enveloppe cylindrique. Celle-ci était formée d'une feuille de cuivre de 2 millimètres d'épaisseur. La capacité ainsi offerte à la vapeur jaugeait un peu plus de 800 litres ; la vapeur y était amenée d'une batterie de générateurs timbrés à 5 et 6 kg., sans interposition de soupape ni même de détendeur, et sans qu'il y eût d'autres organes d'évacuation qu'un robinet à main et un purgeur automatique (vase allemand) destiné à laisser passer l'eau condensée, mais non la vapeur. Le récipient de vapeur ainsi constitué n'était pas timbré. | L'installation du réchauffeur de vinasse, telle qu'elle est indiquée ci-contre, avec le vase allemand, avait été récemment achevée. C'était la nuit ; l'ouvrier distillateur était le seul ouvrier présent dans le local à deux étages, contenant les appareils dont il avait à surveiller le fonctionnement. La pression de vapeur au réchauffeur de vinasse s'était précédemment montrée instable. Déchirure de l'enveloppe cylindrique en cuivre, qui s'est ouverte en plein métal suivant une génératrice, et déroulée en grand. L'ouvrier distillateur a été retrouvé, le corps couvert de brûlures et une jambe cassée, dans l'escalier réunissant les deux étages du local. | Un ouvrier brûlé mortellement. | Excès de pression résultant des défauts de l'installation, de ses irrégularités par rapport au titre V du décret du 30 avril 1880, et des conditions défectueuses de travail dans lesquelles se trouvait placé l'ouvrier préposé à la distillation de l'alcool. |
| 31 juillet. | Exploitation agricole, à Vivy (Maine-et-Loire). | Locomobile batteuse ; chaudière tubulaire à flamme directe, composée d'un corps vertical contenant le foyer et d'un corps horizontal contenant les tubes ; surface de chauffe, 9 mètres carrés ; capacité, 800 litres ; timbre, 6 kg. ; construction en 1863 probablement. Les tôles, de 10 et 9 millimètres d'épaisseur primitive, réduites par l'usure à 9 et 7 millimètres (cette dernière épaisseur correspondant au corps horizontal de [illegible] cent. de diam.) ont été trouvées, après l'explosion, [illegible] dénuées de ductilité ; mais, au surplus, on n'est pas entièrement fixé sur l'état de la chaudière, toutes les parties n'en ayant pas été retrouvées. | Après avoir fonctionné dans une première ferme, où elle avait terminé son travail sous une pression à peine suffisante, la locomobile avait été amenée sur un second emplacement ; on avait refait le feu, avec du bois pour combustible ; les soupapes étaient calées, au moins partiellement ; le travail n'était pas encore repris, et il s'était écoulé depuis sa cessation dans l'autre ferme 10 minutes selon les uns, une demi-heure selon les autres, lorsque l'enveloppe de la chaudière s'est vola en éclats qui furent diversement projetés jusqu'à des distances de 180 et 200 mètres. | Le chauffeur très grièvement blessé, et un ouvrier, qui travaillait à 100 mètres de l'appareil, blessé légèrement. | Insuffisance de la résistance de l'enveloppe par rapport à la pression intérieure. Sans que les causes de cette insuffisance de résistance aient été entièrement déterminées avec certitude, il y a lieu de retenir la vétusté de l'enveloppe et le fait que la pression a pu s'élever rapidement dans cette locomobile dont la machine ne tournait pas et dont les soupapes étaient au moins partiellement calées. |
| 2 août. | Fabrique de désincrustant pour générateurs de vapeur, à Paris. | Chaudière horizontale à un bouilleur, dont le corps cylindrique mesurait 60 centimètres de diamètre et 2 mètres de long. Surface de chauffe, 5m2,5 ; capacité, 865 litres ; timbre, 4 kg. ; âge et origine inconnus. On chauffait principalement avec un combustible végétal humide (résidus de tan non essorés), et l'appareil était soumis à des alternatives répétées de fonctionnement et de chômage. | Déchirure de la partie arrière du corps cylindrique, qui s'est ouverte dans la région de la génératrice inférieure et dont une moitié s'est déroulée et détachée (Pl. XII, *fig.* 7 et 8). Le bas du corps cylindrique portait une corrosion extérieure qui allait en augmentant progressivement des rivures latérales à la génératrice inférieure, et de l'avant à l'arrière. Il y avait aussi de la corrosion intérieure. L'amincissement maximum allait jusqu'à réduire l'épaisseur à 1 millimètre. | L'industriel légèrement blessé par une brique projetée. Dégâts matériels importants. | Corrosion profonde, intérieure et surtout extérieure, de la partie inférieure du corps cylindrique. En raison de l'humidité du combustible employé et des fréquentes alternatives de fonctionnement et de chômage du générateur, ce corps cylindrique était particulièrement exposé à une usure de ce genre, que des mesures appropriées de surveillance et d'entretien auraient dû faire découvrir en temps utile. |
| 4 août. | Papeterie, à Saint-Didier-sur-Beaujeu (Rhône). | Récipient cylindrique horizontal à fonds hémisphériques, de 1m,5 de diamètre, 1m,7 de longueur non compris les fonds, et cubant 4 mètres cubes. L'appareil, servant de lessiveur rotatif, était construit en tôle de fer de 8 à 9mm,8 pour la partie cylindrique, 10 et 11 millimètres pour les fonds. Au milieu de la partie cylindrique était un trou d'homme rectangulaire, de 58 cent. de longueur et 45 cent. de largeur, à cadre en fonte et fermeture autoclave, servant au chargement de l'appareil. Ce lessiveur, d'origine inconnue et âgé de plus de 30 ans, était timbré à 3 kg. ; sa dernière épreuve remontait à un peu plus de 10 ans. Il recevait la vapeur d'une chaudière timbrée à 6 kg. ; il était pourvu d'un robinet d'évacuation de vapeur manœuvrable à la main, et de deux soupapes, dont l'une, qui seule a été retrouvée, avait 46 millimètres de diamètre, 2mm,5 de levée, une charge un peu trop forte pour le timbre, si l'on s'en rapporte aux résultats du calcul, et un mauvais état de rodage. | Le lessiveur fonctionnait depuis une heure et demie environ, et depuis ce temps, c'est à cet appareil seul que la chaudière fournissait de la vapeur. Son robinet d'évacuation de vapeur était fermé ; aucune surveillance n'était exercée sur l'appareil. Fragmentation en un grand nombre de morceaux. On n'a pas reconnu de corrosions importantes. Le métal paraissait aigre et fatigué, autant du moins qu'on en a pu juger par des essais effectués sur les fragments. Une des sections de rupture du cadre en fonte montrait une fissure ancienne. | Un ouvrier, qui travaillait à 6 ou 7 mètres de l'appareil, brûlé grièvement. | L'explosion s'est produite vraisemblablement en raison combinée de l'état de l'appareil, affaibli notamment par une fissure au cadre du trou d'homme, et d'un excès de pression par rapport au timbre du lessiveur. La cause de cet excès de pression est à chercher essentiellement dans les conditions d'installation et d'emploi du récipient, où l'on faisait arriver, pendant un temps prolongé, la vapeur d'une chaudière timbrée à 6 kg., sans qu'aucun orifice normal d'évacuation fût ouvert, ni aucune surveillance exercée sur l'appareil. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 27 août. | Exploitation agricole à Lignorelles (Yonne). | Locomobile batteuse. Chaudière horizontale tubulaire à flamme directe, avec foyer intérieur rectangulaire ; corps cylindrique de 60 cent. de diam., 1m,87 de longueur, construit en tôle de 8 millim. Surface de chauffe, 9 m. carrés ; capacité, 697 litres ; âge inconnu et certainement très ancien. Timbre primitif, 6 atmosphères, remplacé en 1884 par le timbre sensiblement équivalent de 5 kg. ; puis élevé en 1887 à 6 kg. La tôle du corps cylindrique était corrodée intérieurement sur toute la moitié inférieure, et extérieurement dans les parties les plus basses, de telle sorte que l'épaisseur n'était plus que de quelques millimètres sur presque toute la longueur de la génératrice inférieure. Pour aveugler des fuites en pleine tôle qui s'étaient fait jour dans cette partie, auprès de la boîte à fumée, on avait serré la partie malade entre deux contreplaques boulonnées, avec interposition de caoutchouc (Pl. XII, *fig.* 9). | Pendant un arrêt du moteur pour cause de graissage, le corps cylindrique s'est ouvert suivant la génératrice inférieure et fragmenté en plus de vingt lambeaux. Les éclats furent projetés jusqu'à une distance de 225 mètres. L'aiguille du manomètre, à moitié rompue, était dans la direction de 8 kg. ; et un témoin a dit l'avoir vue marquer ce chiffre un peu avant l'explosion. Il semble résulter de l'enquête qu'à ce moment le chauffeur n'était pas à son poste. | Cinq personnes blessées, dont quatre grièvement. | Déplorable état du corps de chaudière, corrodé profondément, et, en outre, raccommodé d'une façon vicieuse. Il est possible d'ailleurs qu'un excès de pression soit intervenu pour déterminer l'explosion. |
| 5 sept. | Exploitation agricole, à Chaudenay-la-Ville (Côte-d'Or). | Locomobile batteuse. Chaudière horizontale, à foyer intérieur et retour de flammes tubulaire. Surface de chauffe, 8m2,5 ; capacité, 850 litres ; timbre, 5 kg. ; construction en 1877. Le foyer était à base rectangulaire, à faces planes verticales et à ciel cylindrique demi-circulaire, et la partie correspondante de l'enveloppe présentait elle-même des joues latérales planes, entretoisées chacune avec la joue correspondante du foyer au moyen de huit entretoises en fer, espacées de 15 cent. Ces entretoises étaient corrodées, de telle sorte qu'elles n'avaient plus, dans la section la plus réduite, que 6 ou 7 mill. de diam. | Déchirure de la joue latérale droite de l'enveloppe du foyer, sur 43 centimètres de hauteur, le long d'un de ses bords verticaux. On a constaté que les huit entretoises étaient toutes rompues (Pl. XII, *fig.* 10, 11 et 12). | Cinq personnes brûlées sans gravité. | Corrosion et fatigue des entretoises reliant le foyer à l'enveloppe, le propriétaire de l'appareil n'ayant pas veillé au bon état de cette partie, conformément à l'article 36 du décret du 30 avril 1880. |
| 17 septembre. | Exploitation agricole, à St-Laurent-d'Aigouze (Gard). | Locomobile batteuse. Chaudière horizontale tubulaire à flamme directe. La plaque tubulaire de boîte à fumée portait, à sa partie inférieure, un trou de lavage elliptique, mesurant 98 millimètres suivant le grand axe, et 65 millimètres suivant le petit, que fermait un tampon non autoclave, maintenu appliqué sur l'ouverture par un boulon à ancre de 16 millimètres (diamètre au fond des filets). | Le trou de lavage ayant donné lieu à une fuite, le feu fut éteint, le joint refait, puis on fit remonter la pression. Le régisseur du domaine et son fils, voulant vérifier la tenue du nouveau joint, rouvrirent la boîte à fumée, et, trouvant sans doute qu'il perdait, se mirent à serrer le boulon. Celui-ci se brisa, et un jet de vapeur et d'eau sortit de l'ouverture. | Quatre personnes brûlées plus ou moins grièvement. | L'accident a eu pour causes une disposition vicieuse de l'appareil et une manœuvre imprudente : la disposition vicieuse ayant consisté en ce que le trou de lavage était fermé par un bouchon non autoclave, et la manœuvre imprudente, à laquelle on était d'ailleurs incité en raison de cette disposition, ayant été celle de resserrer le boulon à ancre de ce bouchon, alors qu'il y avait de la pression dans la chaudière. |
| 15 octob. | Exploitation agricole, à Bouhy (Nièvre). | Locomobile batteuse. Chaudière tubulaire à flamme directe, composée d'un corps vertical contenant le foyer et d'un corps horizontal contenant les tubes. Surface de chauffe, 6m2,2 ; capacité, 848 litres ; timbre, 6 kg. Construction à une époque incertaine, peut-être vers 1869. Le corps horizontal, de 60 centimètres de diamètre, en tôle de 6 à 6mm,5 d'épaisseur, avait à chaque extrémité sa paroi cylindrique relevée en collerette pour venir s'appliquer, d'un côté contre la face verticale correspondante de l'enveloppe du foyer, de l'autre côté contre la plaque tubulaire de boîte à fumée. Cette dernière plaque, de 10 millimètres d'épaisseur, était par suite entièrement plane ; l'assemblage était obtenu au moyen d'une couronne de 39 rivets. | Pendant un arrêt du moteur, motivé par une impossibilité d'alimenter la chaudière (une obstruction par les dépôts s'était faite sur le trajet de l'alimentation), séparation du corps horizontal d'avec la plaque tubulaire de boîte à fumée et fragmentation violente de toute l'enveloppe. Il a été constaté que sur l'étendue de 28 des 39 rivets du pourtour de cette plaque, la collerette du corps cylindrique était fissurée d'ancienne date de trou de rivet à trou de rivet (Pl. XII, *fig.* 13). En outre, l'une des soupapes était collée sur son siège, et l'autre vraisemblablement chargée pour 8 kg. au moins. | Sept personnes tuées, une très grièvement blessée, deux blessées légèrement. | Cassure préexistante, développée sur une grande étendue entre les rivets de la clouure circulaire qui reliait le corps cylindrique à la plaque tubulaire de boîte à fumée. L'origine de cette cassure est à chercher notamment dans les mouvements de soufflet auxquels était soumise la collerette suivant laquelle le corps cylindrique avait été rabattu à sa jonction avec la plaque tubulaire : ces mouvements ayant dû agir d'autant plus puissamment que la chaudière était exposée à de fréquents excès de pression. L'affaiblissement grave résultant de cette avarie a combiné ses effets avec une élévation de pression résultant d'un arrêt de la machine, sans toutefois qu'il soit démontré qu'à ce moment la pression ait excédé le timbre. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 18 octob. | Teinturerie, à Lyon (Rhône). | Récipient de vapeur cylindrique, de 1m,5 de diamètre et 2 mètres de hauteur, timbré à 2kg,5, muni d'une soupape et d'un manomètre. On y faisait arriver de la vapeur au sein d'une décoction aqueuse, jusqu'à ce que la pression fut d'environ 1kg,5; puis, on procédait à l'évacuation du liquide en ouvrant le robinet d'un tuyau plongeur, de sorte que le récipient fonctionnait comme monte-jus; enfin l'on vidait l'appareil de son contenu solide. A cet effet, au bas du récipient, construit en tôle, était fixé un gueulard en fonte, dont l'ouverture, de forme rectangulaire avec coins supérieurs arrondis, mesurait 40 sur 35 centimètres; la pièce de fermeture, appliquée extérieurement, était une porte entièrement amovible, s'appuyant au pourtour du gueulard par l'intermédiaire d'une tresse de chanvre, et maintenue par quatre clavettes passant dans quatre mentonnets, fixés au gueulard chacun par deux vis de 16 millimètres de diamètre. On devait ouvrir cette porte après que la pression, à la suite du fonctionnement comme monte-jus, était tombée dans le récipient; mais celui-ci ne portait point de robinet de décharge directe. | A l'heure de la fin d'une opération qui était faite en dehors du roulement habituel, parce qu'une fuite autour de la porte du gueulard avait fait manquer une opération précédente, départ violent de cette porte; l'ouvrier qui avait été vu quelques instants auparavant devant le gueulard occupé avec un marteau, a été projeté à 4m,5 de distance. Trois des mentonnets du gueulard étaient intacts, et des trois clavettes correspondantes, deux ont été retrouvées au pied de l'appareil; la troisième avait été projetée à une certaine distance; le quatrième mentonnet avait été tordu et était parti avec la porte, les deux vis qui le fixaient sur le gueulard s'étant rompues. | L'ouvrier préposé à l'appareil, brûlé mortellement. | Projection de la porte de déchargement du récipient, dans des circonstances qui n'ont pas été entièrement mises en lumière par les résultats de l'enquête. Quelles qu'aient été ces circonstances, il y a lieu de remarquer que ce récipient aurait dû être muni d'une vanne ou d'un robinet d'évacuation de vapeur, que l'ouvrier aurait eu la consigne d'ouvrir chaque fois après la vidange, avant de procéder à l'ouverture de la porte de déchargement. Le mode de fermeture de cette porte, qui n'était maintenue que par quatre mentonnets à clavettes reliés au gueulard par des vis, était d'ailleurs défectueux. |
| 22 octob. | Teinturerie, à Elbeuf (Seine-Inférieure). | Chaudière semi-tubulaire, de 116 mètres carrés de surface de chauffe, 26m3,712 de capacité, timbrée à 7 kg. Les tubes à fumée, au nombre de 36, mesurant 114 millimètres de diamètre intérieur et 6m,9 de longueur, étaient en laiton, et leur épaisseur avait été à l'origine 3 millimètres. La chaudière avait 15 ans, et tous les tubes dataient de la construction, sauf l'un d'eux (on ne sait lequel) qui avait été posé il y a 7 ans. Le tube indicateur du niveau de l'eau était relié à la chaudière par un tuyau de communication d'eau présentant un point bas sur son parcours. Il y avait, en outre, un flotteur magnétique, dont le sifflet avertisseur ne fonctionnait plus, le collier porteur de la came qui doit actionner le sifflet étant devenu fou le long de la tige, par suite du desserrage de la vis de fixation. | Écrasement d'un tube de la rangée supérieure, sur 0m,90 de longueur, à partir d'une distance de 0m,05 de la plaque tubulaire d'arrière (côté de l'entrée des gaz chauds). Le métal s'est fragmenté de telle sorte qu'une partie seulement des morceaux a pu être retrouvée. Les épaisseurs relevées sur les bords de la cassure variaient de 2mm,4 à 2mm,9. Trois autres tubes de la même rangée, présentant des épaisseurs analogues, se rompirent aussi au ras ou au voisinage de la plaque tubulaire d'arrière; un autre fut déformé. La porte du foyer, dépourvue de tout loquet, s'ouvrit; la batterie, qui comprenait trois grandes chaudières, n'avait point de clapets d'arrêt de vapeur, contrairement au décret du 29 juin 1886, et toutes trois déversèrent leur vapeur dans la chaufferie; la chambre de chauffe était une fosse, n'ayant pour issue qu'un escalier intérieur au local et ayant son pied presque en face du générateur qui s'est avarié. | Deux ouvriers brûlés mortellement et un d'une manière très grave. | Usure et altération du métal des tubes en laiton, dont le diamètre était considérable par rapport à leur épaisseur, dont la longueur était grande, et qui étaient exposés à des températures élevées par suite de la disposition des surfaces de chauffe, et peut-être des alternatives du niveau de l'eau. Il est possible, en outre, mais non démontré, qu'il y ait eu à ce moment un abaissement du plan d'eau, consécutif à l'installation défectueuse du tube indicateur en verre et au non-fonctionnement du sifflet de l'appareil Lethuillier-Pinel, dont le collier porte-came était devenu fou le long de la tige du flotteur. Relativement à la gravité des conséquences de cet écrasement de tubes à fumée, il y a lieu de noter le manque des clapets d'arrêt de vapeur, les dispositions défectueuses de la chaufferie et l'absence d'organe de fermeture aux portes de foyer. |
| 22 octob. | Filature de soie, à Anduze (Gard). | Chaudière cylindrique horizontale à fonds hémisphériques, de 0m,95 de diamètre et 3m,16 de long; capacité, 2 mètres cubes; timbre, 2 kg.; origine ancienne. La tôle du fond hémisphérique d'arrière, primitivement épaisse de 10 ou 11 millimètres, était réduite par les corrosions au point de n'avoir plus en certains points qu'une épaisseur insignifiante. La chaudière était tapissée de 15 ou 18 millimètres d'incrustations. | Le fond d'arrière s'est percé d'un vaste trou, et il s'est produit un jet de vapeur, de gaz et d'escarbilles qui n'a causé aucun accident notable, la chaudière étant dans une cour, et l'usine à peu près déserte. | Néant. | Rupture du fond hémisphérique arrière d'un générateur d'âge ancien, corrodé au point de ne plus présenter, sur les bords de la plaie, qu'une épaisseur de métal insignifiante, et tapissé d'une couche épaisse d'incrustations. |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| 23 octob. | Tissage, à Bussang (Vosges). | Tambour sécheur de 480 litres de capacité, composé d'une virole de 0m,744 de diamètre et 1m,105 de longueur, en tôle de cuivre de 3 millimètres d'épaisseur, terminée par deux plateaux de fonte emboîtés dans la virole. L'assemblage, à chaque extrémité, était obtenu au moyen d'une frette en fer. La surface intérieure de la frette et la surface circulaire du fond en fonte n'étaient pas rainurées, et aucun bourrelet notable n'avait été formé à l'extrémité de la virole de cuivre (Pl. XII, *fig.* 14). L'appareil, construit en 1884 et timbré à 4 kg., recevait la vapeur d'une chaudière timbrée à 7 kg., sans interposition de soupape, et son tuyau d'évacuation aboutissait à un purgeur réglé pour évacuer l'eau condensée et retenir la vapeur. Le directeur et les ouvriers de l'usine reconnaissent que le manomètre du tambour marquait parfois 5 kg. On avait remarqué des suites de vapeur à la jonction d'un fond avec la virole. | Départ violent de l'un des fonds. Pendant que celui-ci était projeté d'un côté, le tambour était lancé de l'autre, heurtait un tambour analogue, qui fonctionnait à proximité, et en hrisait le fond; de sorte que l'explosion se répétait, et le second tambour, partant comme le premier à la manière d'une fusée lancée horizontalement, traversait successivement trois cloisons, enfonçait une porte et s'abattait dans une cour.<br>Cette double explosion paraît avoir dû en partie la violence de ses effets à ce que les deux tambours pouvaient contenir des quantités d'eau notables, par suite de l'organisation imparfaite de leur purge. | Deux personnes tuées et quatre blessées plus ou moins grièvement. | L'explosion doit être attribuée, d'une part, à la fatigue que des excès de pression réitérés avaient imposée à cet appareil dépourvu de la soupape réglementaire; d'autre part, à des défauts dans sa constitution générale et notamment dans l'assemblage du fond qui s'est détaché avec la virole en cuivre. Les effets de l'explosion peuvent avoir été aggravés par une insuffisance de purge, tant de ce récipient que du récipient analogue voisin qui, sous le choc du premier, a sauté à son tour. |
| 2 nov. | Apprêtage d'étoffes, à Flers (Orne). | Tambour sécheur de 0m,50 de diamètre, 2m,10 de long, formé d'une feuille de cuivre soudée sur elle-même suivant une génératrice, et assemblée à ses extrémités avec deux fonds en fonte reliés l'un à l'autre, intérieurement au tambour, par trois tirants. Cet appareil datait de 1866, et sa virole de cuivre, qui paraît avoir eu à l'origine 2 millimètres d'épaisseur, s'était usée par [illegible] envoyé en réparation en 1893 à la suite d'un incendie de l'usine, avait été simplement démonté pour refaire le planage de la virole, puis remonté et éprouvé au timbre de 2kg,5. | Ouverture en grand de la virole cylindrique, qui s'est déchirée à peu près suivant une génératrice, en dehors de la soudure (Pl. XII, *fig.* 15). On a constaté le long des lèvres de la déchirure des amincissements excessifs: l'épaisseur, qui auprès du fond variait de 2 millimètres à 1mm,85, s'abaissait aux différents points de la déchirure jusqu'à un minimum de 1/2 millimètre: c'est la région [illegible] le point de départ de la rupture. | Aucun accident de personnes. | Amincissement excessif, par suite d'usure, de la virole en cuivre de cet appareil, qui datait de près de 30 ans. |
| 6 nov. | Usine d'électricité, à Paris. | Chaudière à petits éléments, système Belleville, de 98 mètres carrés de surface de chauffe, timbrée à 15 kg., tubes de 0m,10 de diamètre. L'arrivée de l'eau dans le collecteur rectangulaire inférieur se faisait par la gauche. La fermeture de la porte de boîte à tubes était assurée par une barre transversale; le fourneau portait une trappe d'expansion à charnière, débouchant dans une gaine qui communiquait avec le conduit de fumée en aval du registre. | Au 7e élément à partir de la gauche du générateur, qui en comprend 9, le 7e tube à partir du bas s'est ouvert en dehors de la soudure, suivant une génératrice de la partie regardant le feu, sur 0m,30 de long, avec bâillement maximum de 9cm,5. Le flux de vapeur et de gaz chauds dut s'évacuer soit par la trappe d'expansion, soit par le chemin des fumées, à cause de l'ouverture en grand du registre. La porte de la boîte à tubes et celle du foyer restèrent closes; il sortit par celle du cendrier une légère bouffée. Cette rupture de tube n'a été connue de l'ingénieur des Mines que tardivement. | Néant. | Ouverture d'un tube bouilleur, en dehors de la soudure; l'enquête opérée tardivement, par suite du défaut d'avis, n'a pu en préciser la cause. |
| 12 nov. | Fabrique de tartre, à Claira (Pyrénées-Orientales). | Chaudière Field de 40m2,20 de surface de chauffe, 2m3,5 de capacité, timbrée à 6 kg. Les tubes bouilleurs pendentifs, au nombre de 113, mesuraient 75 millimètres de diamètre et 1m,16 de longueur. Cet appareil était chaque année en fonctionnement continu pendant deux mois, et restait plein d'eau le reste du temps, sans nettoyage; il n'était vidangé que lorsqu'un tube bouilleur devait être remplacé. L'eau d'alimentation était magnésienne et notablement chlorurée: elle devait provenir d'une nappe saumâtre, l'usine étant à 700 mètres de la mer. Il y avait dans la cour de l'usine un nombre considérable de tubes anciens hors de service; dans plusieurs d'entre eux, le tube intérieur de circulation faisait corps avec l'enveloppe, cimenté par un bouchon de tartre; d'autres avaient été tampon- | Le matin du jour de l'accident, le feu avait été éteint pour remplacer un tube bouilleur qui perdait; on employa à ce remplacement le dernier tube de rechange qui restât. On ralluma à huit heures du soir; une heure et demie après, un autre tube bouilleur s'ouvrit à son extrémité inférieure, et un flux brûlant envahit le local. Un enfant de treize ans, employé dans l'usine à recueillir le tartre sur les parois des cuviers, se reposait sur le lit de camp; lorsqu'on vint à son secours, on le trouva gisant devant la porte du foyer. Il a été constaté que le bas du tube rompu, sur une longueur du 20 à 25 centimètres, était brûlé et profondément altéré: le métal se fendait sous le moindre effort. La chaudière était fortement entartrée.<br>A la suite de l'accident, vingt-neuf tubes pendentifs ont été supprimés, | Un enfant de 13 ans mortellement brûlé. | Mauvais état d'entretien de l'appareil. Le nombre excessif des remplacements de tubes qui avaient dû être opérés au cours du fonctionnement de cette chaudière, les observations qui ont pu être faites sur plusieurs des tubes ainsi remplacés, dont quelques-uns avaient leur partie inférieure entièrement bouchée par le tartre, et dont d'autres avaient été tamponnés par des bouchons de bois; la composition de l'eau employée à l'alimentation; le fait que, le jour même de l'accident, un tube avait dû être remplacé avec le seul tube de rechange qui restât, et que ce remplacement n'eût probable- |

| DATE de l'accident | NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé | NATURE — Forme et destination de l'appareil — Détails divers | CIRCONSTANCES de l'accident | CONSÉQUENCES de l'accident | CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident |
|---|---|---|---|---|---|
| | | nés avec des bouchons de bois. La porte du foyer de cette chaudière était battante, sans loquet. En face de cette porte, et à petite distance du générateur, était installé à demeure un lit de camp, dont les supports étaient fixés à la paroi du local servant de chaufferie. | à cause de leur mauvais état, avant la remise en service de la chaudière. | | ment pas été le seul si l'on eût disposé du matériel nécessaire, puisque après l'accident plusieurs des tubes restants ont été rebutés; enfin, pour ce qui touche, en particulier, le tube qui s'est rompu, la constatation faite par le service des mines que la partie inférieure de ce tube était profondément altérée, ne permettent pas d'attribuer une cause différente à l'accident. |
| 7 déc. | Fabrique de plâtre, à Quincy (Seine-et-Marne). | Chaudière horizontale à deux bouilleurs, de 25 mètres carrés de surface de chauffe, 5m3,780 de capacité, timbrée à 7 kg.; diamètre des bouilleurs 0m,60, longueur 5 mètres; construction en 1892. Les tôles de cet appareil étaient de mauvaise qualité. En particulier celles des bouilleurs, de 8 millimètres d'épaisseur, étaient de ductilité irrégulière. De plus, on n'avait pas employé le chauffage au four avant le cintrage de ces tôles; celles-ci enfin avaient pu souffrir lors du matage extérieur des rivures longitudinales. En 1894, une cassure s'était manifestée dans la région d'une de ces rivures, au bouilleur de gauche; on avait mis une pièce (Cf. *Annales des Mines*, 9e série, t. X, p. 357 et suiv.). | En septembre 1895, une fuite se produisit le long d'une rivure longitudinale, à la virole d'avant du bouilleur de droite. Malgré l'avertissement résultant de l'avarie de l'autre bouilleur, on se borna, après un examen peut-être insuffisant sous le rapport de l'attention ou de la compétence, au dangereux expédient d'un matage, qui fut effectué suivant le chanfrein extérieur, sur 1m,20 de longueur, le 2 octobre. La fuite, au lieu de cesser, s'aggrava; on tarda avant de prendre le parti d'arrêter la chaudière; quelques heures avant le moment où elle aurait cessé son service, elle se déchira violemment. Il a été constaté que, le long de l'assemblage maté le 2 octobre, la tôle extérieure avait été refoulée contre l'autre au point de présenter un bec de près de 3 millimètres de saillie, tandis que la tôle intérieure était rompue suivant une ligne de fissure ancienne située en dehors des trous de rivets, au voisinage du bord de l'autre tôle. | Un homme blessé grièvement et deux sans gravité. Les fragments de la chaudière ont été lancés au loin; le hangar sous lequel était l'appareil a été entièrement démoli. | Fissure développée le long d'une des clouures longitudinales de la virole avant du bouilleur de droite. Les effets provoqués par cette fissure ont été d'autant plus violents que le bouilleur et le corps cylindrique avaient été construits en tôles de mauvaise qualité. L'origine de la fissure du bouilleur doit elle-même être rapportée à cette mauvaise qualité, jointe peut-être à l'influence d'une autre faute de construction, telle qu'un mauvais cintrage ou un matage malavroit ou exagéré. D'autre part, le matage, opéré deux mois avant l'accident dans l'espoir d'arrêter la fuite qui avait lieu le long de la rivure, était loin d'être un remède et a dû contribuer à développer l'avarie. |



# RÉSUMÉ.

## RÉPARTITION DES ACCIDENTS.

| DÉSIGNATION | | NOMBRE | TUÉS | BLESSÉS (*) |
|---|---|---|---|---|
| **I. — Par nature d'établissements :** | | | | |
| Mines, carrières et annexes | Mine de houille | 1 | 9 | » |
| | Fabrique de plâtre | 1 | » | 1 |
| Usines métallurgiques | Métallurgie | 1 | » | 1 |
| | Tréfilerie | 1 | 4 | 3 |
| Agriculture | Battage des grains | 5 | 7 | 10 |
| Industries alimentaires | Minoteries | 3 | 5 | » |
| | Distilleries | 2 | 1 | » |
| Industries chimiques | Fabrique de cellulose | 1 | 1 | 5 |
| | Fabrique de tartre | 1 | 1 | » |
| | Fabrique de désincrustant pour chaudières | 1 | » | » |
| | Fonderie de graisses | 1 | » | » |
| Tissus et vêtements | Filature et tissage | 2 | 2 | 4 |
| | Blanchisseries, teintures, apprêts | 5 | 3 | 1 |
| Papeteries | | 3 | 2 | 1 |
| Entreprises de travaux et diverses | Grue roulante sur le quai d'un port | 1 | 1 | » |
| | Lavoir | 1 | » | » |
| | Eclairage électrique | 3 | » | » |
| Chemins de fer | Locomotive | 1 | » | 2 |
| Bateaux et engins flottants | Bateaux à vapeur | 1 | 1 | 1 |
| | Engin de levage à bord d'un bateau de pêche | 1 | 1 | 1 |
| TOTAUX | | 36 | 38 | 30 |
| **II. — Par espèces d'appareils.** | | | | |
| 1° *Chaudières chauffées en tout ou en partie à l'extérieur :* | | | | |
| Horizontales non tubulaires, à foyer extérieur | | 6 | 9 | 1 |
| Horizontales semi-tubulaires | à foyer extérieur | 2 | 3 | 1 |
| | à foyer intérieur (**) | 1 | 4 | 3 |
| Verticale, non tubulaire, à foyer extérieur (***) | | 1 | » | » |
| A petits éléments | | 4 | 1 | 1 |
| 2° *Chaudières non chauffées à l'extérieur :* | | | | |
| Horizontales tubulaires | à flamme directe | 8 | 11 | 13 |
| | à retour de flamme | 1 | » | » |
| Verticales | | 4 | 3 | 1 |
| 3° *Récipients* | | 9 | 7 | 10 |
| TOTAUX | | 36 | 38 | 30 |

(*) Ayant eu plus de vingt jours d'incapacité de travail. Pour les blessures moins graves, voir le bulletin détaillé, qui mentionne tous les blessés signalés par l'enquête administrative.

(**) Chaudière à foyer intérieur, retour de flamme tubulaire, et chauffage extérieur par troisième parcours des gaz.

(***) Double fond de bassine à cuire.

### III. — D'après les causes présumées résultant de l'étude des dossiers administratifs.

1° *Conditions défectueuses d'établissement :*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mauvaise qualité des tôles | 1 | | |
| Mauvaises dispositions d'un fond embouti | 1 | | |
| Mauvais assemblage d'un fond en fonte avec une virole en cuivre | 1 | | |
| Retirures de fonte à la naissance d'une nervure | 1 | | |
| Dispositions de pièce en fonte prêtant aux inconvénients du retrait lors de la coulée, à des dilatations inégales en service et à des efforts de flexion | 1 | 8 | |
| Disposition non autoclave d'un tampon de vidange | 1 | | |
| Installation entraînant des pressions trop fortes pour la résistance de l'appareil | 2 | | |

2° *Conditions défectueuses d'entretien :*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Corrosions et usure de tôles | 11 | | |
| Fissure développée le long d'une ligne de flexion | 1 | | |
| Cassure préexistante développée entre rivets | 1 | | |
| Corrosion d'entretoises | 1 | | |
| Usure de tubes à fumée | 3 | 23 | 41 |
| Brûlure de tubes vaporisateurs | 2 | | |
| Cassure préexistante d'une partie en fonte | 2 | | |
| Fatigue résultant d'excès de pression antérieurs à l'accident | 1 | | |
| Tamponnage vicieux d'un trou de plaque tubulaire | 1 | | |

3° *Mauvais emploi des appareils :*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Surchauffe par manque d'eau | 1 | | |
| Surchauffe par défaut de nettoyage ou par surmenage | 1 | 6 | |
| Excès de pression | 3 | | |
| Serrage d'un boulon à ancre sur une chaudière en pression | 1 | | |

4° *Causes non précisées* 4

Nota. — On trouve 41 causes pour 36 accidents, parce que, dans 5 cas, l'accident a été porté comme dû à la coexistence de 2 causes, savoir : 1° dispositions défectueuses d'un fond embouti et corrosion de tôle (8 février) ; 2° corrosion de tôle et excès de pression (13 juillet) ; 3° cassure préexistante d'une partie en fonte, et excès de pression (4 août) ; 4° disposition non autoclave d'un tampon de vidange, et serrage du boulon à ancre de ce tampon pendant que la chaudière était en pression (17 septembre) ; 5° mauvais assemblage d'un fond en fonte avec une virole en cuivre, et fatigue résultant d'excès de pression antérieurs à l'accident (23 octobre).



# NOTE

SUR LES

# DÉGAGEMENTS INSTANTANÉS DE GRISOU

Par M. Frédéric DELAFOND, Ingénieur en Chef des Mines.

Préliminaires. — M. l'Inspecteur Général Haton de la Goupillière, Président de la Commission du Grisou, nous a confié la tâche de présenter à cette Commission le résumé d'un important mémoire publié, en 1895, dans les *Annales des Travaux Publics de Belgique*, par M. Roberti-Lintermans, Ingénieur en chef, Directeur des Mines, chargé du service d'étude des accidents et du grisou.

Nous avions été invité à faire connaître, en outre, dans notre exposé, les principaux faits mentionnés durant ces dernières années, par les Ingénieurs qui s'étaient occupés des dégagements du grisou tant en France qu'à l'étranger.

Nous avons été ainsi amené à étudier, non seulement le mémoire de M. Roberti-Lintermans, mais encore divers autres mémoires, parmi lesquels nous citerons notamment les suivants :

Mallard, Expériences sur la pression du grisou dans la houille, par M. Lindsay Wood (*Annales des Mines*, 3e série, tome I).

Dufrane, Les dégagements instantanés de grisou (*Bulletin de l'industrie minérale*, 3e série, tome I).

Ichon et Lombard, Note sur les dégagements instantanés du grisou aux mines de Bessèges (*Annales des Mines*, 9e série, tome I).

Petit, Pression du grisou dans la 13e couche du puits du Treuil des houillères de Saint-Étienne (*Bull. Industrie minérale*, 3e série, tome VIII).

SIMON, Note sur quelques expériences faites au siège n° 1 des mines de Liévin pour mesurer la pression du grisou (*Annales des Mines*, 9e série, tome VIII).

### § 1er. — Résumé des faits observés dans les dégagements instantanés.

Le mémoire de M. Roberti-Lintermans renferme l'analyse de tous les dégagements instantanés survenus en Belgique, de 1880 à 1891, qu'ils aient été suivis ou non d'accidents de persomes; c'est la suite de l'étude magistrale publiée jadis par M. Arnould pour les dégagements survenus avant 1880.

Les dégagements instantanés, mentionnés de 1880 à 1891, s'élèvent au nombre considérable de 131, soit en moyenne 1 par mois; 37 d'entre eux, soit environ le quart, ont fait des victimes, dont le nombre total a été de 98 (94 tués, 4 blessés).

Deux accidents seulement, survenus les 5 avril 1881 et 3 avril 1885, aux houillères de Marcinelle-Nord, ont eu une gravité exceptionnelle; dans le premier il y a eu 23 victimes, et dans le second 18. Pour les autres accidents, le nombre maximum de victimes a été de 4. Dans un seul cas, le grisou s'est enflammé, et c'est au jour que cette inflammation a eu lieu (Marcinelle-Nord, 5 avril 1881). Il est intéressant de constater ainsi que les lampes n'ont jamais été en défaut; c'est là un témoignage, non seulement de la haute sécurité que procurent les lampes Mueseler, mais encore des soins que les exploitants belges apportent au bon entretien de ces appareils. Disons aussi que c'est un témoignage de la prudence et du sang-froid dont fait preuve le personnel en présence du danger.

Si l'on analyse les causes incidentes qui ont, dans les divers dégagements instantanés, entraîné des victimes, on constate que plus des trois quarts de ces dernières ont



succombé à l'asphyxie. Cette asphyxie a été déterminée soit par du charbon pulvérulent qui a été projeté sur les ouvriers et les a ensevelis, soit par le grisou lui-même, qui avait envahi le courant d'air et l'avait rendu irrespirable. C'est cette dernière cause qui a fait le plus grand nombre de victimes.

De l'examen détaillé des dégagements instantanés qui ont été étudiés, il nous paraît utile de retenir certains faits de nature à jeter quelque lumière sur ces phénomènes encore assez mal connus.

CIRCONSTANCES DANS LESQUELLES ONT EU LIEU LES DÉGAGEMENTS INSTANTANÉS. — *Districts à dégagements instantanés.* — Les dégagements instantanés ont été localisés, jusqu'à présent, dans un petit nombre de mines situées le plus généralement sur la lisière sud du bassin belge; en outre, dans ces mines, quelques couches seulement donnent lieu à des dégagements.

*Influence de l'inclinaison de la couche.* — La pente du gîte n'exerce aucune influence; les dégagements ont lieu indifféremment dans les plateures ou dans les dressants.

*Influence des dérangements.* — Une influence prépondérante paraît, au contraire, être exercée par les dérangements qu'ont subis les couches (failles, plissements, serrements, etc.); sur les 131 dégagements étudiés, 12 seulement ont eu lieu dans des parties où les gites avaient une allure régulière.

*Absence d'indices précurseurs.* — Le dégagement instantané n'est, le plus souvent, signalé par aucun signe précurseur; parfois même le chantier ne paraissait pas auparavant dégager de grisou. De nombreux faits, parmi

lesquels nous relaterons seulement les suivants, justifient cette conclusion.

Le 30 octobre 1880, à l'Agrappe, dans une taille chassante en plateure, on n'avait pas observé de traces sensibles de grisou, lorsqu'eut lieu un dégagement subit de gaz projetant 600 hectolitres de charbon pulvérulent.

Le 11 juin 1886, à l'Agrappe, dans une taille en plateure, 4 trous de sonde de 5 mètres de longueur, forés en avant de la taille, ne dénotaient pas une venue exceptionnelle de grisou, lorsqu'une très forte commotion se produisit inopinément ; 5.000 hectolitres de charbon furent projetés ou déplacés, et le grisou fut refoulé à plus de 100 mètres du côté de l'arrivée de l'air.

Le 30 août 1886, à cette même mine de l'Agrappe, dans une galerie de traçage en plateure, 4 trous de sonde, dont 2 de 5 mètres, précédaient l'avancement et n'avaient fourni aucune indication utile, lorsqu'une irruption subite de grisou se produisit, projetant plus de 600 hectolitres de charbon.

Le 3 avril 1885, à Marcinelle-Nord, le front de taille était précédé de trous de sonde de 7 mètres de longueur. Ces derniers ne donnaient lieu qu'à un dégagement normal de grisou, lorsqu'une irruption de gaz se produisit inopinément, asphyxiant 18 ouvriers et projetant 1.250 hectolitres de charbon poussiéreux.

Le 21 avril 1891, à la mine des Produits, une invasion exceptionnelle de grisou, avec refoulement de ce gaz jusqu'au puits d'entrée d'air, se produisait dans un travers-banc qui venait de rencontrer une couche de houille ; 4 trous de sonde traversant complètement cette couche avaient donné si peu de grisou qu'on n'avait pas hésité à faire partir des coups de mine.

Disons d'ailleurs, au sujet des sondages, que l'arrêté royal du 28 avril 1884 rend les forages obligatoires dans les couches à dégagements instantanés ; or, malgré l'adoption de ces mesures, il n'y a eu, sur les 131 dégagements étudiés, que 29 cas où les ouvriers aient été avertis, par des indices précurseurs, de la présence à proximité d'une quantité exceptionnelle de grisou.



On peut donc dire que, malgré les forages exécutés en avant des chantiers, les dégagements subits se produisent le plus souvent sans qu'aucun indice précurseur ait éveillé l'attention.

*Dégagements successifs en des points voisins.* — Des dégagements instantanés peuvent se produire successivement dans une même couche en des points très peu distants les uns des autres.

Nous citerons notamment les exemples ci-après :

Le 13 février 1885, à l'Agrappe, au niveau de 640 de la couche Chauffournoise, dans une taille en plateure, se produisait un dégagement avec projection de 190 hectolitres de charbon.

Le 28 février, dans la même taille, à 7 mètres plus loin, avait lieu un deuxième dégagement avec projection de 150 hectolitres de charbon.

Enfin, à 6 mètres au delà, toujours dans la même taille, se produisait un troisième dégagement.

D'autres chantiers de cette couche présentèrent les mêmes phénomènes ; aussi constate-t-on que, d'août 1884 à août 1885, l'étage de 640 de la couche Chauffournoise fut le théâtre de 23 dégagements instantanés, soit en moyenne deux par mois.

*Influence de la nature des chantiers.* — Les dégagements ont lieu soit pendant la période de dépilage, soit pendant celle de préparation ou de reconnaissance.

Sur 131 dégagements, 100 se sont produits dans des chantiers de dépilage, et 31 seulement dans d'autres chantiers. Mais, si on tient compte du faible développe-

ment que présentent généralement ces derniers, on est amené à considérer la période de préparation et de reconnaissance comme beaucoup plus dangereuse que celle du déhouillement.

Disons, d'ailleurs, que les plus forts dégagements constatés de 1880 à 1891 se sont produits dans la période de reconnaissance ou de préparation ; ainsi, pour 4 d'entre eux, le grisou a été refoulé jusqu'au puits d'extraction; dans 3 de ces cas, le dégagement s'est produit dans des travers-bancs (Bellevue, 1880; Marcinelle-Nord, 5 avril 1881; Produits, 21 avril 1891); le quatrième a eu lieu dans une galerie de préparation au charbon (Marcinelle-Nord, 3 avril 1885).

Si l'on compare les volumes des matériaux projetés lors de 12 dégagements survenus en travers-bancs et de 7 dégagements survenus dans des galeries de préparation au charbon, on obtient les moyennes suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| Galeries dans la couche : | 477 | hectolitres de matériaux projetés |
| Travers-bancs : | 1.251 | — — |

C'est donc dans les travers-bancs que les dégagements atteignent leur intensité maximum.

Pareil résultat paraît d'ailleurs être rationnel ; le drainage préalable du grisou d'un gite, notable dans les tailles et appréciable dans les galeries en couches, est à peu près nul dans un travers-banc.

*Influence de la profondeur.* — Les dégagements spontanés, qui étaient exceptionnels tant que les travaux n'étaient pas descendus au-dessous du niveau de 300 mètres, deviennent de plus en plus fréquents et intenses à mesure que les travaux s'approfondissent.

Faisons observer incidemment que pareille constatation permet de redouter de sérieuses difficultés dans l'avenir pour l'exploitation des bassins houillers, tant en Belgique qu'ailleurs.



*Existence de massifs perméables très grisouteux entourés par des massifs imperméables.* — L'ensemble des faits observés tend à établir que, dans les houillères donnant lieu à des dégagements instantanés, il existe des masifs perméables très grisouteux entourés de massifs où la houille est dure, compacte au point de former une barrière infranchissable au grisou.

L'existence de massifs où la houille est compacte, à peu près imperméable au grisou, paraît résulter bien nettement des constatations faites jadis en Angleterre et récemment en France aux mines de Saint-Étienne et de Liévin.

En Angleterre, M. Lindsay Wood avait, dans des expériences sur la pression du grisou, fait les observations suivantes :

A la mine Boldon, un trou de sonde de $9^{m},70$ avait permis de constater que le grisou présentait à cette profondeur l'énorme pression de $32^{kg},4$. Deux autres forages de $4^{m},83$ et de $2^{m},35$ avaient permis de relever respectivement les pressions de $29^{kg},8$ et de $20^{kg},8$.

A la mine Harton, un sondage de $11^{m},32$ avait indiqué une pression de $20^{kg},7$; huit mois après, dans le même sondage, la pression était encore de $11^{kg},1$.

A la mine Eppleton, un sondage qui n'avait que $1^{m},07$ avait indiqué une pression de $3^{kg},86$.

L'existence, à de faibles profondeurs, de pressions aussi exceptionnelles, se maintenant à un taux élevé pendant une longue période, établit bien que, dans les trois mines précitées, la houille était remarquablement compacte et pouvait être considérée comme pratiquement imperméable au grisou.

A Liévin, M. Simon a observé des pressions de $7^{kg},50$ à une profondeur de 12 mètres.

Pour 3 trous de sonde voisins, forés dans la veine Frédéric, qui avaient indiqué des pressions variant de $4^{kg},20$ à $5^{kg},70$ à des profondeurs comprises entre 9 et 12 mètres, la pression n'a baissé, en moyenne, que de 1/3 dans l'espace de deux années.

A la mine de Treuil, M. Petit a observé, à une profondeur de $4^{m},50$, une pression de $3^{kg},10$ ; cette dernière était encore de $2^{kg},20$ après six semaines.

Ajoutons, enfin, qu'en Belgique, d'après des expériences déjà anciennes, on aurait constaté, au fond de certains sondages des mines de Bellevue, des pressions atteignant 18 et même 23 kilogrammes (*).

De cet ensemble de faits concordants observés en Angleterre, en Belgique et en France, il est permis de conclure que la houille présente parfois une compacité telle qu'elle peut être, dans le domaine de la pratique, considérée comme imperméable au grisou.

D'autre part, la fréquence des dégagements spontanés survenus notamment en Belgique, l'importance des projections de charbon pulvérulent qui en sont la conséquence, montrent que, dans certains massifs, la houille est, à proprement parler, explosive (**) ; elle présente une perméabilité telle que le grisou s'y dégage simultanément sur une superficie notable, entraînant avec lui le charbon qu'il pulvérise, absolument comme dans une bouteille de champagne l'acide carbonique entraîne le liquide à l'état pulvérulent.

Toutefois, il importe de remarquer que ces massifs explosifs ne s'étendent que sur des superficies restreintes et le plus souvent minimes. On constate, en effet, que les

(*) Pernolet et Aguillon, *Rapport de mission en Belgique fait à la Commission du grisou* (page 18).

(**) On retrouve, en effet, alors des phénomènes analogues à l'explosion d'un réservoir à gaz comprimé : violente expansion de gaz avec projection de matières et bruit plus ou moins intense.



vides qui résultent des dégagements spontanés, même les plus intenses, sont peu étendus. Ainsi, celui créé par le dégagement qui fit, le 3 avril 1885, 18 victimes à Marcinelle-Nord, n'avait que 2 mètres de largeur sur 2 mètres de profondeur. Le fait, déjà signalé ci-dessus, de dégagements instantanés survenus successivement dans une même couche en des points rapprochés les uns des autres, prouve également le peu d'étendue occupée par les massifs explosifs.

L'existence de massifs perméables explosifs, et entourés de massifs imperméables, paraît donc justifiée. Elle rend bien compte, d'ailleurs, de la plupart des faits observés.

Ainsi, les forages ne doivent, vu leur faible diamètre, donner lieu à aucun dégagement tant qu'ils restent dans le massif imperméable ; il suffit qu'il reste au fond du trou une cloison de charbon compacte, de quelques décimètres ou peut-être même de quelques centimètres, pour que cette cloison résiste à la pression du grisou. Si, au contraire, on s'approche du massif perméable et explosif par une galerie à large section, la paroi, ayant à supporter une pression souvent fort élevée, pourra être projetée, quand bien même le chantier serait encore à une distance de plusieurs mètres du massif dangereux. On s'explique très bien ainsi pourquoi les sondages ne donnent le plus souvent aucune indication utile. Il faudrait, pour qu'ils remplissent le but désiré, qu'ils eussent de grandes longueurs ; il faudrait, en outre, qu'ils fussent assez nombreux pour opérer une reconnaissance complète en avant des chantiers ; cette double condition est d'une réalisation difficile dans la pratique des mines.

Un ancien Ingénieur aux mines de l'Agrappe, M. Bufrane, avait observé que dans ces mines les quartiers qui avaient donné lieu à des dégagements instantanés étaient groupés par zones. Ces dernières, qu'il appelle zones infestées, seraient « entourées de parties plus dures, plus com-

« pactes qui formeraient une barrière annulaire à l'expan-
« sion et à la répartition uniformes du gaz délétère ».

Les zones infestées de M. Dufrane paraissent bien correspondre à la réalité ; les massifs de houille explosifs sont parfois groupés en grand nombre dans un espace restreint, soit par suite de dérangements subis par les gîtes, soit par toute autre cause inhérente aux circonstances qui ont accompagné la formation de la houille.

### § 2. — Moyens propres à éviter les accidents.

Les moyens propres à éviter les accidents peuvent se ranger en deux catégories :

Les uns, qui sont préventifs, ont pour but d'empêcher les dégagements instantanés, ou, tout au moins, de réduire leur intensité ;

Les autres ont pour objet de préserver les ouvriers contre les conséquences souvent désastreuses de ces dégagements.

Moyens préventifs. — M. Roberti-Lintermans mentionne les moyens préventifs suivants :

Sondages de reconnaissance ;

Limitation de la rapidité des avancements des chantiers ;

Avance donnée à l'exploitation de la couche la moins grisouteuse, lorsqu'on a affaire à un faisceau de couches.

Examinons successivement ces divers moyens.

*Sondages.* — Les sondages ont été fort critiqués en Belgique et ailleurs. On leur reproche, comme nous l'avons déjà dit, de ne fournir que des indications insuffisantes. On trouve, en outre, qu'ils ont l'inconvénient d'affaiblir la résistance du front de taille du chantier.

On fait observer, enfin, que leur exécution est difficile



dans les couches disloquées ou faillées, parfois même impraticable, à cause de la friabilité du charbon, alors que c'est précisément dans ce cas que les dégagements instantanés sont le plus à redouter.

Ces critiques sont assurément justifiées ; cependant, tout en n'accordant avec raison aux sondages qu'une confiance limitée, il y a là un moyen préventif qui ne saurait être laissé de côté, et qui peut rendre parfois de réels services. Il ne faut pas oublier, en effet, que, dans quelques cas, ils ont révélé en temps utile l'existence d'un danger ; et la lutte contre les dégagements instantanés présente de telles difficultés qu'il ne faut négliger aucun moyen même imparfait.

Aux houillères de Saint-Étienne, l'Ingénieur principal, M. Petit, espère d'ailleurs obtenir de sondages effectués méthodiquement des indications précieuses sur la sécurité de la mine.

Mallard avait, en 1882, émis l'avis qu'il serait utile de pouvoir, au front de taille des chantiers, se rendre compte à chaque instant de la répartition des pressions, de façon à retarder l'avancement, lorsque le taux d'accroissement de ces dernières dépasserait certaines limites. C'est cette indication que M. Petit a mise à profit aux houillères de Saint-Étienne.

Toutefois, la pression du grisou ne constitue pas le seul élément à considérer ; ainsi, de fortes pressions dans une houille très compacte ne créent pas un grave péril. Le danger doit être, en réalité, proportionnel, non seulement à la pression du grisou, mais encore au volume du gaz contenu dans le massif explosif. Ce volume doit dépendre lui-même de la porosité de la houille et de l'importance du massif explosif. On peut apprécier la porosité de la houille en observant le temps que la pression met à atteindre son maximum dans les forages ; on peut également, en multipliant les sondages, reconnaître si le

massif explosif a une importance notable. C'est ainsi qu'on s'efforce de procéder aux houillères de Saint-Étienne, et théoriquement on aurait là une solution préventive excellente. Malheureusement on ne peut, dans les tailles, multiplier les sondages autant qu'il serait désirable. Les massifs explosifs ont, en effet, des dimensions restreintes, et il faudrait des sondages très rapprochés pour reconnaître sûrement leur existence et leur importance; d'autre part, les évaluations un peu exactes de la pression et de la porosité sont des opérations assez délicates, que le moindre défaut d'étanchéité dans les joints des appareils peut fausser grandement. Enfin, dans les galeries ou travers-bancs qui présentent plus de danger que les tailles, il sera souvent difficile de concilier les exigences de l'avancement avec les lenteurs que comportent l'exécution des sondages et les mesures de la pression du grisou et de la porosité de la houille. La méthode usitée aux houillères de Saint-Étienne ne saurait donc, pensons-nous, malgré les sérieux services qu'elle peut rendre dans certains cas, constituer une solution générale et complète de la question.

*Deuxième moyen préventif.* — M. Roberti-Lintermans indique comme deuxième moyen préventif de pousser lentement l'avancement des tailles et des galeries.

Dans les tailles, la pression du toit écrase les massifs jusqu'à une certaine distance et y provoque des fissures; dans les galeries, le foisonnement du charbon produit plus ou moins un résultat analogue. Ces fissures provoquent un drainage du grisou, dont l'écoulement s'opère ainsi lentement et progressivement.

La précaution recommandée est assurément excellente, mais on ne peut pas toujours, à cause des exigences de la production, limiter autant qu'il serait utile la rapidité des avancements.



*Troisième moyen préventif.* — Le troisième moyen recommandé consiste, quand on exploite simultanément plusieurs couches, à faire marcher en avant les travaux de la couche la moins grisouteuse. Si les chantiers de cette dernière sont en avance de six mois ou d'un an, les dislocations provoquées par le déhouillement, tant au toit qu'au mur du gite, se seront propagées jusqu'aux autres couches et y auront déterminé des cassures. Le grisou des massifs perméables pourra se répandre ainsi dans les massifs primitivement imperméables, sa pression sera diminuée, et le danger pourra être singulièrement atténué lorsqu'on exploitera ces couches.

Ce procédé est fort rationnel et semble devoir donner de bons résultats; mais il faut, ce qui ne se présentera pas toujours, que la disposition des gîtes permette de l'appliquer.

*Méthode basée sur l'emploi des explosifs.* — Aux mines de Bessèges, M. Marsaut a employé une méthode toute différente, qui a été déjà usitée aux mines de Rochebelle pour parer aux dégagements instantanés d'acide carbonique. Ces derniers présentent absolument les mêmes particularités que les dégagements instantanés de grisou; les mêmes moyens préventifs peuvent donc être appliqués dans les deux cas. A Rochebelle et à Bessèges, on a abandonné radicalement les procédés usités ailleurs, tels que les sondages, et on a recours à de grands coups de mine qui sont tirés après que le personnel a été mis en sûreté. Ces explosions disloquent les terrains, même les plus compacts, y provoquent des cassures et les rendent plus ou moins perméables au grisou. La pression de ce gaz diminue alors dans les massifs explosifs, d'où une réduction de danger ; les fissures, jouant le rôle de sondages, peuvent, en outre, donner lieu à des soufflards qui décèlent le péril. Enfin, et surtout, si les chantiers sont à

proximité d'un massif explosif, la dislocation des bancs résultant des coups de mine provoquera généralement le dégagement instantané du grisou sans qu'un accident soit à redouter, les ouvriers ayant été remontés au jour ou, tout au moins, mis en sûreté.

Cette méthode a incontestablement l'avantage d'être assez économique et de permettre un avancement rapide des chantiers ; toutefois, elle est appliquée depuis un trop petit nombre d'années pour qu'il soit possible, dès à présent, de se prononcer sûrement sur sa valeur ; on ne saurait dire notamment s'il n'y a pas inconvénient à faire usage d'explosifs dans des mines éminemment grisouteuses.

MOYENS PROPRES A PRÉSERVER LES OUVRIERS CONTRE LES CONSÉQUENCES DES DÉGAGEMENTS INSTANTANÉS. — M. Roberti-Lintermans énumère les nombreuses mesures recommandées ou adoptées en Belgique, pour garantir les ouvriers contre les conséquences des dégagements instantanés.

Nous passerons en revue les plus importantes.

Ces mesures sont les suivantes :

1° Emploi de lampes de sûreté offrant toute sécurité, et suppression de tout feu nu, tant au fond qu'au voisinage des puits au jour :

Ces précautions sont évidentes et n'exigent aucun commentaire. Nous nous bornerons à dire incidemment que les dégagements instantanés seraient plus redoutables encore si, au lieu de couches minces, on avait affaire à des couches puissantes ; il faut tenir compte, en effet, des incendies spontanés qui sont malheureusement fréquents dans les gites épais et qui peuvent déterminer alors l'inflammation du grisou. Des mesures de sécurité toutes spéciales peuvent être nécessaires en pareil cas ;

2° Emploi, pour les travaux préparatoires, de cloisons



verticales d'aérage, établies dans les galeries et amenant au front de taille de l'air frais venant directement du puits d'entrée, l'air contaminé allant au puits de sortie sans passer par d'autres chantiers en activité ; établissement, dans les cloisons, en arrière du front de taille, de portes placées en divers points et permettant aux ouvriers de se réfugier dans les compartiments d'arrivée de l'air frais.

Lors d'un dégagement spontané survenu, le 1er juin 1882, à Sainte-Aldegonde, dans un montage occupant quatre ouvriers, deux de ces derniers ont échappé à l'asphyxie en se réfugiant ainsi dans le compartiment d'arrivée d'air.

Pour que pareille mesure soit sûrement efficace, il faut, ainsi qu'il est recommandé en Belgique, que l'aérage soit déterminé par un ventilateur soufflant, sans quoi l'obstruction de l'extrémité des cloisons par des éboulements suspendrait la ventilation ;

3° Adoption de mesures destinées à assurer la rapide évacuation du grisou ; établissement, à cet effet, de larges voies de retour d'air ou, mieux encore, de galeries multiples, et installation à la surface de ventilateurs capables de fournir, au besoin, un débit très supérieur au débit normal. Toutefois, il est essentiel que les mécaniciens des ventilateurs s'aperçoivent assez tôt que le courant de retour contient une proportion anormale de grisou pour activer, en temps utile, la marche des appareils.

Ces mesures, excellentes assurément, sont néanmoins insuffisantes pour garantir les ouvriers contre les conséquences de très forts dégagements de grisou ;

4° Enfin, le dernier moyen préconisé est l'établissement d'une canalisation fournissant de l'air comprimé. Des robinets seraient placés à peu d'intervalle les uns des autres (tous les 30 mètres environ), et jusqu'à une certaine distance en arrière des fronts de taille (100 ou 200 mètres). Leur ouverture permettrait aux ouvriers,

au cas où les galeries seraient infestées de grisou, de respirer de l'air pur et d'échapper à l'asphyxie.

Ces conduites d'air comprimé rempliraient ainsi le rôle que nous avons mentionné précédemment pour les cloisons d'aérage ; mais elles présentent sur ces dernières divers avantages.

Les cloisons ne peuvent être établies que dans les galeries de préparation ou de reconnaissance, tandis que les conduites d'air comprimé peuvent être et sont généralement installées aussi dans les voies principales qui desservent les chantiers de dépilage. Ces conduites peuvent également dans ce dernier cas, bien qu'assez éloignées de la plupart des chantiers, rendre à l'occasion d'utiles services.

Les cloisons sont d'un entretien difficile et coûteux dans les galeries qui sont peu solides, tandis que la bonne conservation des tuyaux en fer étiré est aisée à obtenir.

Ajoutons, enfin, que, lorsque les galeries d'exploration sont à de grandes distances des puits d'entrée d'air, il devient peu pratique de conduire aux fronts de taille de l'air fourni par ventilateurs soufflants établis au jour. Il en résulterait une complication et des dépenses qui seraient généralement jugées excessives. Dans les mines pourvues d'une installation d'air comprimé, la canalisation s'étend, au contraire, sans difficultés sur toute l'étendue du champ d'exploitation.

Nous considérons donc l'emploi de l'air comprimé comme très rationnel dans les mines à dégagements instantanés, et de nature à rendre de grands services au point de vue de la sécurité des ouvriers. Le grisou ne provoquant l'asphyxie que d'une façon peu rapide et les ouvriers échappant souvent au danger des éboulements, le personnel des chantiers a alors le temps de fuir et d'arriver jusqu'aux robinets où il respirera de l'air pur.

On pourrait d'ailleurs compléter avantageusement l'installation de robinets par celle de refuges avec portes susceptibles de se fermer assez hermétiquement, et dans lesquels de l'air comprimé serait insufflé en cas de besoin. M. Marsaut a établi de pareils refuges aux mines de Bessèges, et semblable disposition serait, dans la plupart des mines, d'une application facile et très peu coûteuse.



Nous croyons utile d'ajouter que ces robinets et refuges sont de nature à rendre des services non seulement en cas de dégagements instantanés de grisou, mais encore dans les cas de dégagements instantanés d'acide carbonique qui constituent également, comme vient de le montrer un accident récent, un redoutable danger. Sans doute, l'acide carbonique est plus asphyxiant que le grisou ; cependant il est permis de penser qu'en rapprochant suffisamment des fronts de taille les robinets d'air comprimé ou les refuges, on arriverait, dans bien des cas, à préserver la vie de nombreux ouvriers.

Dans les mines particulièrement sujettes aux incendies, les ouvriers seraient également, dans bien des cas, préservés de l'asphyxie par l'emploi des moyens précités.

L'air comprimé, qui rend déjà, sous de nombreux rapports, de si grands services dans les mines, paraît donc être susceptible encore d'une nouvelle et importante application sur laquelle nous croyons utile d'appeler tout particulièrement l'attention des exploitants.

# BULLETIN.

## ACTES DE COURAGE ET DE DÉVOUEMENT.

### ACCIDENTS ARRIVÉS DANS LES MINES ET CARRIÈRES.

*Extrait des rapports du Ministre de l'Intérieur, approuvés par le Président de la République en 1896 (*).*

| NOMS, prénoms et qualités. | LIEUX et dates. | ANALYSE des faits. | RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or | MÉDAILLES en argent | MENTIONS honorables |
|---|---|---|---|---|---|
| 28 mars 1896. | | | | | |
| EURE. | | | | | |
| BARBOT (Prosper), homme d'équipe à la gare de Calleville. | Marnière souterraine à la Haye-de-Calleville. (28 janvier 1896.) | S'est exposé aux plus grands dangers en sauvant deux hommes sur le point de périr asphyxiés dans un puits. | | 2e | |
| 24 avril 1896. | | | | | |
| GARD. | | | | | |
| TURC (Antoine), chef de chantier aux mines de la Grand'Combe. | Mines de la Grand'-Combe. (9 juillet 1895.) | S'est exposé aux plus grands dangers en tentant de sauver un mineur asphyxié par une explosion de grisou. | | 2e | |
| SAONE-ET-LOIRE. | | | | | |
| JANIAUD (Antoine), chef de poste à Montceau-les-Mines. | Mines de Montceau-les-Mines. (4 février 1895.) | A fait preuve de beaucoup de courage et de dévouement lors d'une explosion survenue dans le puits Ste-Eugénie des mines de Montceau. | | 2e | |
| 28 mai 1896. | | | | | |
| ISÈRE. | | | | | |
| EYMARD (Jean), ouvrier mineur à la Motte-d'Aveillans. | Mines de la Motte-d'Aveillans (11 avril 1896.) | A fait preuve d'un courage et d'un dévouement exceptionnels en portant secours à un mineur enseveli sous un éboulement. | | 2e | |

(*) Cet état fait suite à celui qui a été inséré dans le 2e volume de 1895 (p. 662).



| NOMS, prénoms et qualités. | LIEUX et dates. | ANALYSE des faits. | RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or | MÉDAILLES en argent | MENTIONS honorables |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 juin 1896. | | | | | |
| PAS-DE-CALAIS. | | | | | |
| COINTE (Maurice), porion aux mines de houille de Vendin. | Mines de houille de Vendin. (29 novembre 1895.) | Se sont particulièrement distingués en portant secours, au péril de leur vie, à des ouvriers ensevelis sous un éboulement. | | 1re | |
| WATTEZ (Dieudonné), ouvrier mineur à Vendin. | | | | 2e | |
| FLAHAUT (Adolp.), ouvrier mineur au même lieu. | | | | | Mention honorable |
| MARIN (Auguste), ouvrier mineur au même lieu. | | | | | Id. |
| PECQUEUR (César), ouvrier mineur au même lieu. | | | | | Id. |
| 25 août 1896. | | | | | |
| GARD. | | | | | |
| PROSTDAM (Donat), chef de poste aux mines de Rochebelle. | Mines de houille de Rochebelle (Puits Fontanes). (2 juin 1896.) | Se sont tout particulièrement distingués lors du sauvetage des victimes d'un accident dû à un dégagement d'acide carbonique. | | 1re | |
| GUILHAUMOND (Benjamin), maître mineur. | | | | 1re | |
| AYEL (François), mineur. | | | | 2e | |
| SYLVAIN (Baptiste), mineur. | | | | 2e | |
| GILLES (François), manœuvre. | | | | 2e | |
| VIDAL (Auguste), manœuvre. | | | | 2e | |
| BALDY (Henri), receveur. | | | | 2e | |
| DUBROAS (Henri), ouvrier. | | | | | Mention honorable |
| FONTUGNE (Eugène), ouvrier. | | | | | Id. |
| BALDY (Louis), ouvrier. | | | | | Id. |
| TESTUD (Barthélemy), ouvrier. | | | | | Id. |
| TESTON (Louis), ouvrier. | | | | | Id. |
| 28 décembre 1896. | | | | | |
| NORD. | | | | | |
| BOQUILLON (Henri), ouvrier mineur à Vicoigne. | Mines de houille de Vicoigne. (6 mai 1896.) | S'est tout particulièrement distingué pour sauver, au péril de sa vie, un de ses camarades sur le point de périr asphyxié. | | 1re | |

## STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE LA BELGIQUE EN 1895.

### I. — Charbonnages.

1° *Exploitation.* — La production houillère de la Belgique a été, en 1895, de 20.457.604 tonnes, d'une valeur totale de 193.357.700 francs. Ces résultats, comparés à ceux de 1894 (*), accusent une diminution de 76.897 tonnes et une augmentation de 2.065.600 francs.

La valeur moyenne de la tonne a haussé, en effet, de 13 centimes et est ressortie à 9f,45.

L'extraction s'est répartie comme suit entre les districts houillers :

| | Tonnes. | Francs. |
|---|---|---|
| Hainaut | 14.892.430 | 139.860.300 |
| Namur | 516.890 | 3.899.200 |
| Liège | 5.048.284 | 49.598.200 |
| Totaux | 20.457.604 | 193.357.700 |

L'effectif du personnel ouvrier s'est élevé à 118.957 travailleurs, soit 1.854 de plus qu'en 1894; en voici la répartition :

| | | OUVRIERS à l'intérieur | OUVRIERS à la surface |
|---|---|---|---|
| Hommes et garçons | au-dessus de 16 ans | 80.401 | 21.206 |
| | de 14 à 16 ans | 4.198 | 1.312 |
| | de 12 à 14 ans | 1.594 | 1.181 |
| Femmes et filles | au-dessus de 21 ans | 595 | 1.589 |
| | de 16 à 21 ans | 673 | 3.759 |
| | de 12 à 16 ans | » | 2.249 |
| Totaux | | 87.461 | 31.496 |
| | | 118.957 | |

(*) Voir pour la Statistique de 1894, *Annales des Mines*, 2e vol. de 1895, p. 664.



Depuis l'année 1891, qui a précédé celle de la mise en vigueur dans les mines de la loi du 13 décembre 1889 sur le travail, le nombre des femmes et des filles occupées à l'intérieur des travaux a diminué des deux tiers. La catégorie des jeunes filles au-dessous de 16 ans a même entièrement disparu en 1894.

Quant aux enfants au-dessous de 16 ans employés souterrainement, leur nombre s'est réduit du tiers.

La production par ouvrier du fond a été de 234 tonnes, soit 3 tonnes de moins qu'en 1894.

La production par ouvrier du fond et de la surface réunis a été de 172 tonnes, 3 de moins également que l'année précédente.

Le montant des salaires s'est élevé, en 1895, à la somme de 112.743.800 francs, ce qui établit le salaire annuel moyen de l'ouvrier, sans distinction de travail ni de sexe, à 948 francs, 7 de plus qu'en 1894. En réalité, si l'on déduit les retenues pour les institutions de prévoyance, certaines consommations et les amendes, ce salaire se réduit à 933 francs, et le salaire journalier moyen, à raison de 295 jours de travail, à 3f,17. Par rapport à l'année précédente, le salaire annuel net s'est accru de 0,8 p. 100, et le salaire journalier de 1,9 p. 100.

Le salaire journalier net de 3f,17 se décompose comme suit :

| | |
|---|---|
| Ouvriers de la surface | 2f,44 |
| Ouvriers du fond | 3f,43 |

— Si l'on distingue les exploitations qui ont présenté des excédents de recettes ou de dépenses, on trouve qu'il y a eu :

| | | |
|---|---|---|
| 77 charbonnages en gain, avec un bénéfice de | 11.654.700 | francs |
| 47 — en perte, avec un déficit de | 3.357.300 | — |
| Soit une différence en faveur des recettes de | 8.297.400 | francs |

2° *Mouvement commercial des combustibles.* — Le mouvement commercial des combustibles en Belgique, durant l'année 1895, se résume dans les chiffres suivants :

| | | | Tonnes |
|---|---|---|---|
| Production | | | 20.457.604 |
| Importation | Houille | 1.530.364 | |
| | Briquettes | 3.452 | 2.027.123 |
| | Coke | 362.834 | |
| Exportation | Houille | 4.661.477 | |
| | Briquettes | 459.702 | 6.260.216 |
| | Coke | 870.983 | |
| Consommation | | | 16.224.511 |

Le coke a été exprimé en houille, dans le total de l'importation, de l'exportation et de la consommation, à raison d'un rendement en coke de 73,5 p. 100 de houille.

Quant aux briquettes, il a été compté 90 kilogrammes de houille pour 100 kilogrammes d'agglomérés.

### II. — Mines métalliques et minières.

La production des mines métalliques et des minières de la Belgique, en 1894, a été la suivante :

| | Tonnes | | Francs |
|---|---|---|---|
| Minerais de fer | 312.637 | valant | 1.480.450 |
| Minerais de plomb | 220 | | 25.500 |
| Minerais de zinc | 12.230 | | 564.250 |
| Pyrite | 3.510 | | 36.150 |
| Minerais de manganèse | 22.478 | | 286.270 |
| Représentant une valeur totale de | | | 2.392.620 |

Cette valeur est inférieure de 92.580 francs à celle de l'année précédente.

L'effectif du personnel ouvrier a été de 2.201 individus, ne comprenant ni femmes, ni filles, et seulement un garçon au-dessous de 16 ans.

### III. — Carrières.

Le tableau ci-dessous indique, pour l'année 1895, les quantités et les valeurs des produits extraits des carrières belges :

| | QUANTITÉS | VALEURS |
|---|---|---|
| Pierres de taille | 137.353 m. cubes. | 11.928.300 fr. |
| Poudingue | 245 m. cubes. | 33.400 |
| Chaux, moellons et pierrailles | 2.488.840 m. cubes. | 10.679.700 |
| Pierres à paver | 92.378.800 pièces. | 7.875.800 |
| Dalles et carreaux | 95.137 m. carrés. | 148.200 |
| Marbre | 12.790 m. cubes. | 2.121.200 |
| Ardoises | 32.652.000 pièces. | 1.228.100 |
| | 690 m. cubes. | 30.500 |
| Pierres à faux et à rasoir | 70.000 pièces. | 55.600 |
| *A reporter* .... | | 34.100.800 |



| | | |
|---|---|---|
| *Report* | | 34.100.800 fr. |
| Castine | 163.800 m. cubes. | 437.000 |
| Terres plastiques | 195.485 tonnes. | 1.364.700 |
| Marne et craie | 100.160 m. cubes. | 156.000 |
| Sable | 381.170 m. cubes. | 790.600 |
| Silex pour faïencerie | 24.870 m. cubes. | 100.000 |
| Silex, gravier et pierrailles pour empierrement | 202.590 m. cubes. | 516.800 |
| Terres ocreuses et autres pour couleurs | 500 m. cubes. | 10.000 |
| Sulfate de baryte | 32.750 tonnes. | 229.300 |
| Feldspath | 1.900 m. cubes. | 7.800 |
| Phosphate de chaux | 250.080 m. cubes. | 1.928.600 |
| Craie phosphatée | 256.650 m. cubes. | 1.487.100 |
| Représentant une valeur totale de | | 41.128.700 fr. |

La valeur de la production des carrières est supérieure de 2.748.400 francs à celle de 1894. L'augmentation a porté principalement sur les pierres de taille, les pavés, la castine et les matériaux pour empierrement.

Il y a eu 1.409 carrières en exploitation, comprenant dans leur ensemble 1.181 sièges à ciel ouvert et 639 sièges souterrains, et occupant 31.801 ouvriers.

La province d'Anvers n'est pas comprise dans le tableau ci-dessus. Elle a fourni, par le travail de 3.505 ouvriers, 390.000 mètres cubes de sables tertiaires, notamment pour verreries, et 775.000 mètres cubes d'argile de la même formation ; le tout pour une valeur de 2.054.300 francs.

### IV. — Métallurgie.

Les usines métallurgiques sont réparties en cinq groupes :

#### 1° *Hauts-fourneaux.*

| | |
|---|---|
| Nombre d'usines (actives) | 17 |
| Nombre de hauts-fourneaux (actifs) | 29 |
| Nombre d'ouvriers | 2.949 |
| Production en fonte | 829.234 tonnes. |
| Valeur de la production | 40.208.900 francs. |
| Prix moyen de la tonne | 48f,24 |

2° *Usines à fer.*

| | |
|---|---|
| Nombre d'usines (actives) | 48 |
| Nombre de fours à puddler (actifs) | 358 |
| — à réchauffer (id.) | 157 |
| — autres (id.) | 210 |
| Nombre d'ouvriers | 13.586 |
| Production en fers finis | 445.899 tonnes. |
| Valeur de la production | 55.729.190 francs. |
| Prix moyen de la tonne | 124f,98 |

3° *Aciéries.*

| | |
|---|---|
| Nombre d'usines (actives) | 10 |
| Nombre de fours Martin (actifs) | 7 |
| Nombre de convertisseurs (actifs) | 14 |
| Nombre de fours à réchauffer (actifs) | 29 |
| Nombre d'ouvriers | 4.691 |
| Production en acier (produits finis) | 367.947 tonnes. |
| Valeur de la production | 42.419.270 francs. |
| Prix moyen de la tonne | 115f,27 |

4° *Usines à zinc.*

| | |
|---|---|
| Nombre d'usines (actives) | 12 |
| Nombre de fours (actifs) | 366 |
| Nombre d'ouvriers | 4.783 |
| Production en zinc brut | 107.664 tonnes. |
| Valeur de la production | 38.496.700 francs. |
| Prix moyen de la tonne | 357f,56 |

5° *Usines à plomb et à argent.*

| | | |
|---|---|---|
| Nombre d'usines (actives) | | 3 |
| Nombre de fours à manche (actifs) | | 17 |
| — à réverbère (id.) | | 1 |
| — de coupelle (id.) | | 4 |
| Nombre d'ouvriers | | 671 |
| Production | Plomb brut | 15.573 tonnes. |
| | Argent | 31.543 kilog. |
| Valeur de la production. | Plomb brut | 4.203.800 francs. |
| | Argent | 3.430.000 francs. |
| Prix moyen | de la tonne de plomb brut | 269f,94 |
| | du kilogramme d'argent | 108f,74 |



## V. — Accidents.

Les accidents survenus dans le courant de l'année 1895 se répartissent comme suit :

| | CHARBONNAGES | MINES métalliques et minières | CARRIÈRES souterraines | USINES métallurgiques | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|
| Nombre d'accidents. | 283 | 2 | 7 | 27 | 319 |
| Morts | 158 | 1 | 5 | 13 | 177 |
| Blessés grièvement. | 133 | 1 | 2 | 20 | 156 |

Le nombre des ouvriers occupés dans les charbonnages ayant été (fond et surface réunis) de 118.957, la proportion des ouvriers tués, afférente à l'industrie houillère, a été de 1,44 par 1.000 travailleurs. Elle avait été de 1,62 l'année précédente.

La classification par *causes* des accidents survenus dans les houillères est donnée dans le tableau suivant :

| | | | | Nombre des Accidents | Tués | Blessés |
|---|---|---|---|---|---|---|
| I. — *Intérieur des travaux.* | | | | | | |
| Accidents survenus dans les puits et dans les descenderies conduisant aux travaux souterrains. | A l'occasion du transport des ouvriers | Par câbles, cages, etc. | | 14 | 9 | 5 |
| | | Par échelles | | » | » | » |
| | | Par fahrkunst | | » | » | » |
| | Par éboulements, chutes de pierres et corps durs | | | 3 | 3 | » |
| | Dans d'autres circonstances | | | 13 | 7 | 6 |
| Accidents survenus dans les puits intérieurs et les cheminées d'exploitation | Par l'emploi | des câbles | | » | » | » |
| | | des échelles | | » | » | » |
| | Dans d'autres circonstances | | | 9 | 6 | 3 |
| Éboulements (y compris chutes de pierres et blocs de houille, etc.) dans les chantiers et les voies | | | | 110 | 81 | 32 |
| Accidents causés par le grisou. | Dégagement normal. | Inflammations dues | aux coups de mines | » | » | » |
| | | | aux appareils d'éclairage | Ouverture de lampes | 1 | 1 | » |
| | | | | Défectuosités, bris, etc. | 2 | » | 2 |
| | | | à des causes diverses ou inconnues | | » | » | » |
| | | Asphyxies | | | 2 | 2 | » |
| | Irruptions subites suivies | d'inflammation | | | » | » | » |
| | | d'asphyxies, de projections de charbon ou de pierres, etc. | | | 1 | 1 | » |
| Asphyxies par d'autres gaz que le grisou | | | | | » | » | » |
| Coups d'eau | | | | | » | » | » |
| Emploi des explosifs | Tirage des mines | | | | 14 | 3 | 15 |
| | Autres causes | | | | 2 | » | 2 |
| Transport et circulation des ouvriers | Sur voies de niveau ou peu inclinées | | | | 24 | 9 | 15 |
| | Sur voies inclinées où le transport s'effectue par | hommes et chevaux | | | 2 | 1 | 1 |
| | | treuils ou poulies | | | 28 | 13 | 15 |
| | | traction mécanique | | | » | » | » |
| Causes diverses | | | | | 27 | 2 | 26 |
| Total | | | | | 252 | 138 | 122 |
| II. — *Surface.* | | | | | | | |
| Chutes dans les puits | | | | | » | » | » |
| Manœuvres de véhicules | | | | | 12 | 10 | 2 |
| Machines et appareils mécaniques | | | | | 8 | 3 | 5 |
| Causes diverses | | | | | 11 | 7 | 4 |
| Total | | | | | 31 | 20 | 11 |
| Total général | | | | | 283 | 158 | 133 |

(Extrait de la *Statistique des mines, minières, carrières, usines métallurgiques et appareils à vapeur*, pour l'année 1895, par M. E. Harzé.)



# BIBLIOGRAPHIE.

## DEUXIÈME SEMESTRE DE 1896 (*).

## OUVRAGES FRANÇAIS.

### 1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

Beudon (J.). — Sur les systèmes d'équations aux dérivées partielles dont les caractéristiques dépendent d'un nombre fini de paramètres (thèse). In-4°, 53 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (6981)

Floquet (G.). — Sur certaines fonctions à trois déterminations considérées comme solutions d'une équation différentielle linéaire. In-8°, 11 p. Nancy, Berger-Levrault et C^ie. (6790)

Haure (M.). — Recherches sur les points de Weierstrass d'une courbe plane algébrique (thèse). In-4°, 89 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7090)

Laurent (P.). — Note sur les fonctions secondaires de dérivation. In-8°, 13 p. Paris et Nancy, Berger-Levrault et C^ie (Extrait de la *Revue d'artillerie*). (10722)

Montet (F.). — Esquisse d'une étude analytique des courbes algébriques et transcendante les plus remarquables, avec leurs principales applications en mécanique, en astronomie et en physique. In-8°, IV-60 p. Lyon, Georg. (11351)

Ocagne (M. d'). — Cours de géométrie descriptive et de géométrie infinitésimale. In-8°, XI-429 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (5777)

(*) Les numéros qui figurent à la suite de chaque ouvrage sont ceux sous lesquels ces ouvrages sont respectivement inscrits dans la Bibliographie française et dans les Bibliographies étrangères.

Portier (B.). — Le Carré diabolique de 9 et son dérivé, le carré satanique de 9 (carré de base magique aux deux premiers degrés), tirés du carré magique de 3. In-8°, 32 p. Alger, Jourdan. (5525)

Raffy (L.). — Leçons sur les applications géométriques de l'analyse (éléments de la théorie des courbes et des surfaces). In-8°, VI-251 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 7f,50. (11790)

Rocquigny-Adanson (G. de). — Les Nombres triangulaires, note suivie de diverses questions sur ces nombres. In-8°, 32 pages. Moulins, impr. Auclaire. (11413)

Tarry (G.). — Sur la théorie des carrés magiques impairs à deux degrés. In-8°, 4 p. et tableau graphique. Paris, 28, rue Serpente. (11839)

Vidaillet (J.). — Sur une interprétation géométrique des coordonnées trilinéaires et Application aux courbes de degré *n* tangentes à une conique en *n* points. Préface de *G. Papelier*, professeur de mathématiques spéciales. In-4°, 116 p. avec fig. Paris, l'auteur, 4, rue Perdonnet. 6 fr. (11858)

Weingarten (J.). — Mémoire sur la déformation des surfaces. In-4°, 46 p. Paris, Impr. nationale (Extr. des *Mém. présentés par divers savants à l'Acad. des Sciences*). (12300)

### 2° *Physique et Chimie.*

Ariès (E.). — Chaleur et Énergie. In-16, 168 p. Paris, Gauthier-Villars et fils; Masson et Cie. 2f,50. (9376)

Bloch (R.-S.). — Recherches expérimentales sur l'absorption métallique de la lumière et les phénomènes optiques qui s'y rattachent (thèse). In-8°, 86 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (11673)

Bourbouze (J.-G.). — Modes opératoires de physique, de *J. G. Bourbouze*. Rassemblés et augmentés par *Ch. Hemardinquer*, préparateur à la Faculté des sciences. Publiés avec l'autorisation de Mme Ve Bourbouze. Préface de M. *G. Lippmann*, de l'Institut. In-8°, VIII-327 p. avec fig. Paris, impr. Desgrandchamps. (12175)

Curie (P.). — Propriétés magnétiques des corps à diverses températures (thèse). In-8°, 123 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (10868)

Delemer (J.). — Sur le mouvement varié de l'eau dans les tubes capillaires cylindriques évasés à leur entrée, et sur l'établissement du régime uniforme dans ces tubes (thèse). In-4°, 83 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (10871



Delépine (S.-M.). — Sur une méthode de séparation des méthylamines par l'aldéhyde formique (thèse). In-4°, 50 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7036)

Denigès (G.). — Méthode générale pour le dosage du mercure sous une forme quelconque; Applications pharmaceutiques. In-8°, 16 p. Bordeaux, impr. Gounouilhou (Extr. du *Bull. des travaux de la Société de pharmacie de Bordeaux*). (8377)

Deuxième supplément au Dictionnaire de chimie pure et appliquée d'Ad. Wurtz, publié sous la direction de *Ch. Friedel*, professeur à la Faculté des sciences de Paris, avec la collaboration de MM. P. Adam, A. Béhal, G. de Bechi, A. Bigot, L. Bourgeois, L. Bouveault, E. Burcker, C. Chabrié, P.-T. Cleve, Ch. Cloëz, A. Combes, C. Combes, A. Etard, Ad. Fauconnier, H. Gall, A. Gautier, H. Gautier, E. Grimaux, G. Griner, etc. T. II. Fascicule 28. In-8° à 2 col., p. 561 à 640. Paris, Hachette et Cie. 2 fr. (11509)

Duclau (S.). — Histoire de l'électricité. Ouvrage revu et complété par *A. Dubois*, ancien inspecteur primaire. Petit in-f°, 318 p. avec 30 fig. dans le texte et 9 grav. hors texte. Limoges, Ardant et Cie. (5989)

Duhem (P.). — Théorie thermodynamique de la viscosité, du frottement et des faux équilibres chimiques. In-8°, 212 p. Paris, Hermann (Extr. des *Mémoires de la Soc. des sciences physiques et naturelles de Bordeaux*). (8380)

Encyclopédie chimique, publiée sous la direction de M. Frémy. T. 9 : Chimie organique. 2e section : Chimie physiologique. 2e fascicule : Chimie des liquides et des tissus de l'organisme (deuxième partie, livres 5 et 6), par le Dr *Garnier*, professeur à la Faculté de médecine de Nancy. In-8°, p. 703 à 1232. Paris, Ve Ch. Dunod et P. Vicq. 20 fr. (12206)

Estaunié (E.). — Les sources d'énergie électrique. In-8°, 348 p. avec fig. Paris, May et Motteroz. (10672)

Etaix (L.). — Contribution à l'étude de quelques acides bibasiques. In-8°, 64 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (10895)

Figuier (A.). — Excès d'intensité du courant initial dans les piles voltaïques. In-8°, 7 p. Bordeaux, impr. Gounouilhou. (Extr. des *Proc.-verb. des séances de la Soc. des sciences physiques et naturelles de Bordeaux*). (8393)

—— Recherches sur l'affinité chimique. In-8°, 20 p. Bordeaux, impr. Gounouilhou (Extr. des *Mém. de la Soc. des sciences physiques et naturelles de Bordeaux*). (8394)

Gautier (A.). — Cours de chimie minérale, organique et biolo-

gique. 2e édition, revue et mise au courant des travaux les plus récents. Chimie organique. In-8°, XXI-672 p. avec 72 grav. Paris, G. Masson. (10680)

GRIMAUX (E.). — Lavoisier (1743-1794), d'après sa correspondance, ses manuscrits, ses papiers de famille et d'autres documents inédits. 2e édition, avec 10 grav. hors texte. In-8°, IX-405 p. Paris, F. Alcan. (5422)

HANTZSCH (A.). — Précis de stéréochimie. Traduction française, publiée par MM. *Ph.-A. Guye* et *M. Gautier*, professeurs de chimie à l'Université de Genève. Avec une note additionnelle de M. *A. Werner*, professeur de chimie à l'Université de Zurich. In-8°, 227 p. Paris, G. Carré. (7497)

HENRY (C.). — Les rayons Röntgen. Paris. In-16, 64 p. avec fig. 1f,75.

HOULLEVIGUE (L.). — De l'influence de l'aimantation sur les phénomènes thermo-électriques. In-8°, 75 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (10934)

JARIAS. — Les Rayons X. In-8°, 8 p. Bourg, imp. Allombert. (9251)

LEBLOND (H.). — Cours élémentaire d'électricité pratique. 2e édition. In-8°, VI-468 p. avec fig. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. 7 fr. (7516)

LE DANTEC (L.-M.). — Étude critique sur la lumière et l'électricité. In-8°, 44 p. avec fig. Saint-Just, Impr. universelle. (5464)

LEFÈVRE (J.). — La Spectroscopie. In-16, 188 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils; Masson et Cie. 2f,50. (5466)

—— Spectrométrie. Appareils et Mesures. In-16, 212 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils; Masson et Cie. 2f,50. (7783)

LIMB (C.). — Mesure directe des forces électro-magnétiques (thèse). In-4°, VII-120 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (10970)

MANEUVRIER (G.). — Nouvelle méthode de détermination du rapport $\frac{C}{c}$ pour l'air et d'autres gaz. In-4°, VII-227 p. avec fig. et tableaux. Paris, Gauthier-Villars et fils. (10977)

MANGON (E.). — Le Courant électrique différentiel. In-8°, 61 p. avec fig. Paris, Baudry et Cie. (8450)

MARIE (T.). — Recherches sur les acides cérotique et mélissique (thèse). In-4°, VIII-107 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (10978)

MOISSAN (H.) et L. OUVRARD. — Le Nickel. In-16, 183 p. Paris, Gauthier-Villars et fils; Masson et Cie. 2f,50. (7808)

MOURET (G.). — L'Entropie, sa mesure et ses variations. Exposé synthétique des principes fondamentaux de la science de la chaleur. In-8°, 93 p. avec fig. Paris, G. Carré. (Extr. de la *Revue générale des sciences pures et appliquées*). (9682)



NEYRENEUF. — Vibrations circulaires des cordes. In-8°, 9 p. Caen, Delesques. (Extr. des *Mém. de l'Acad. nat. des sciences, arts et belles-lettres de Caen*). (8155)

PELLAT (H.). — Cours de physique générale. Polarisation et Optique cristalline. Leçons professées à la Sorbonne en 1895 par *H. Pellat*, professeur-adjoint à la Faculté des sciences de Paris. Rédigées par MM. *Duperray* et *Gallotti*, agrégés de l'Université. In-8°, 293 p. avec fig. Paris, G. Carré. (7559)

PERREAU (F.). — Étude expérimentale de la dispersion et de la réfraction des gaz (thèse). In-4°, 65 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (11010)

PULFRICH (M.-C.). — Appareil universel pour les mesures de réfraction et de dispersion. In-8°, 7 p. avec fig. Tours, impr. Deslis Frères (Extr. du *Journal de physique*). (8490)

REBIÈRE (J.-C.-G.). — Contribution à l'étude des benzoates métalliques (thèse). In-4, 56 p. Bordeaux, impr. Gounouilhou. (9050)

RIVIÈRE (G.) et G. BAILHACHE. — Dosage de l'azote à l'état nitrique et en l'absence des nitrates. Modifications aux méthodes Schlœsing et Kjeldahl (mémoires présentés à l'Académie des Sciences et à la Société chimique). In-8°, 26 p. Versailles, impr. Cerf. (9505)

THEVENET (A.). — Recherches sur les influences de la chaleur, du vent et de la vapeur d'eau sur la pression barométrique. In-4°, 68 p. Mustapha-Alger, impr. Giralt. (5573)

TOLLENS (B.). — Les Hydrates de carbone. Traduit de l'allemand par *Léon Bourgeois*, répétiteur à l'École polytechnique. In-8°, XII-771 p. avec 24 fig. Paris, Dunod et Vicq. (7611)

VIGOUROUX (E.). — Le Silicium et les Siliciures métalliques (thèse). In-8, 120 p. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7170)

VILLARD (P.). — Etude expérimentale des hydrates de gaz (thèse). In-8°, 158 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. (7171)

VITOUX (G.). — Les Rayons X et la Photographie de l'invisible. In-18 jésus, 192 p. avec 30 fig. et dessins, et 16 planches hors texte. Paris, Chamuel. (6441)

### 3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

BERNARD (A.). — Géologie agricole et Cartes agronomiques. Relations entre les formations géologiques et la composition du sol, conférence faite au concours régional de Moulins, le 29 mai 1896. In-8°, 56 p. Mâcon, impr. Protat Frères (Extr. des *Annales de l'Acad. de Mâcon*). (11071)

Bertrand (C.-E.). — Nouvelles remarques sur le *kerosene shale* de la Nouvelle-Galles du Sud. In-8°, 114 p. Autun, impr. Dejussieu père et fils (Extr. du *Bull. de la Soc. d'hist. nat. d'Autun*). (9780)

Reuret (L.) et R. Brunet. — Étude géologique, agricole et économique du département de la Dordogne. In-8°, 132 p. et planches. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (Extr. des *Annales de l'Institut national agronomique*.) (10640)

Bleicher. — L'Homme et les Animaux domestiques de la station préhistorique de Belleau (Meurthe-et-Moselle). In-8°, 3 p. Nancy, impr. Berger-Levrault et Cie. (9128)

Bonno. — L'Age du creusement des vallées dans la contrée qui compose le département de Seine-et-Marne. In-8°, 4 p. Paris, Imp. nationale (Extrait de la *Revue des travaux scientifiques*). (10643)

Brun (J.) et G. Barbo. — Diatomées miocènes. Espèces nouvelles, déterminées, décrites et dessinées par *J. Brun*, professeur à Genève, trouvées, montées et publiées par le comte *G. Barbo*, à Milan. Gr. in-4°, 31 pages. Tours, impr. Bousrez (Extr. du *Diatomiste*). (8855)

Bulletin des services de la carte géologique de la France et des topographies souterraines. N° 49. T. 7. La région de la Brèche du Chablais (Haute-Savoie); par *Maurice Lugeon*, docteur ès sciences physiques et naturelles. In-8°, 310 p. avec 58 fig. dans le texte et 8 planches. Paris, Baudry et Cie (Ministère des Travaux publics). (6308)

Bureau (E.). — Sur quelques palmiers fossiles d'Italie. In-8°, 5 p. Paris, Impr. nationale (Extr. du *Bull. du Muséum d'hist. nat.*). (8201)

Carte agronomique et géologique du département de l'Aisne, à l'échelle de 1/40.000, dressée par M. *Gaillot*, directeur de la station agronomique de l'Aisne. Publiée sous les auspices du conseil général de l'Aisne, avec le concours du Ministère de l'Agriculture. Paris, impr. Monrocq. (585)

Carte des plis de la région de Castellane, à l'échelle de 1/200.000. Paris, impr. Erhard frères. (1242)

Carte géologique détaillée de l'Algérie, à l'échelle de 1/50.000. Feuille n° 22 : Ménerville. — Feuille n° 43 : Palestro. Gravées par Erhard frères. Paris, impr. Erhard frères. (589)

Carte géologique détaillée de la France, à l'échelle de 1/80.000. Feuille n° 112 : Dijon. 6 fr. — Feuille n° 224 : Castellane. 6 fr. Avec notices explicatives. Paris, impr. Lemercier et Cie. (1005)



Carte tectonique des hautes chaînes calcaires de Savoie, à l'échelle de 1/320.000, par *E. Haug*. Paris, impr. Erhard frères. (1259)

Daviot (H.) et B.-F. Payebien. — Memento de géologie et de paléontologie, contenant : 1° notions élémentaires de géologie; 2° clefs analytiques pour la détermination sûre et prompte d'environ 230 genres fossiles. In-16, 226 p. avec fig. Mâcon, impr. Protat. 3 fr. (11168)

Deville (J.) et J. Raulin. — Carte agronomique de la commune de Brignais (département du Rhône). Gr. in-4°, 4 p. et carte. Lyon, impr. Schneider frères. (11186)

Carte agronomique de la commune de Givors (département du Rhône). Gr. in-4°, 4 p. et carte. Lyon, impr. Schneider frères. (11187)

Douxami (H.). — Études sur les terrains tertiaires du Dauphiné, de la Savoie et de la Suisse occidentale. In-8°, IV-322 p. avec fig. et planches. Paris, Masson et Cie (Extr. des *Annales de l'Université de Lyon*.) (8644)

Exploration scientifique de la Tunisie. Description des Échinides fossiles des terrains jurassiques de la Tunisie recueillis par M. *Le Mesle*, membre de l'exploration scientifique de la Tunisie; par *Victor Gauthier*. In-8°, 25 pages. Paris, Impr. nationale. (9853)

Failles et Géogénie, d'après les observations et découvertes faites dans le Nivernais; par *F.-L.* Publié par les soins de l'Institut scientifique du Sacré-Cœur, à Paray-le-Monial. In-4°, 259 p. et planches. Clermont-Ferrand, Malleval. (8661)

Fliche (P.). — Étude sur la flore fossile de l'Argonne (Albien-Cénomanien). Gr. in-8°, 195 p. et 17 planches. Nancy, imp. Berger-Levrault et Cie (Extr. du *Bull. de la Soc. des Sciences de Nancy*). (11223)

Fournier (E.). — Description géologique du Caucase central (thèse). In-4°, 300 p. et pl. Marseille, impr. Barthelet et Cie. (8930)

Gaudry (A.). — Essai de paléontologie philosophique, ouvrage faisant suite aux Enchaînements du monde animal dans les temps géologiques. In-8°, 235 p. avec 204 grav. Paris, G. Masson. (7735)

—— Les Pythonomorphes de France. In-4°, 13 p. et pl. Paris, Baudry et Cie (Extr. des *Mémoires de paléontologie de la Société géologique de France*). (11987)

Gentil (L.). — Sur un gisement de hornblende basaltique à Beni-Saf (Oran). In-8°, 4 pages. Paris, Impr. nationale (Extr. du *Bull. du Muséum d'hist. nat.*). (6797)

Girardot (A.). — Études géologiques sur la Franche-Comté septentrionale. Le système oolithique. Paris. In-8°, 416 p. 12 fr.

Glangeaud. — Les Formations tertiaires au sud du détroit poitevin. In-8°, 4 p. Paris, Impr. nationale (Extr. du *Bull. du Muséum d'hist. nat.*). (8233)

Julien (A.). — Le Terrain carbonifère marin de la France centrale. I, Étude paléontologique et stratigraphique des faunes; II, Transgression de la mer carbonifère; III, Anciens glaciers de la période houillère supérieure dans la France centrale (avec coupes géologiques et 17 planches de fossiles en héliogravure de la maison Dujardin). Gr. in-4°, xxiii-305 p. Paris, Masson et C^ie^. (5732)

Lacroix (A.). — Minéralogie de la France et de ses colonies. Description physique et chimique des minéraux; Étude des conditions géologiques de leurs gisements. T. II. Première partie. In-8°, 256 p. avec fig. Paris, Baudry et C^ie^. (10963)

Larrazet. — Recherches géologiques sur la région orientale de la province de Burgos. Paris. In-8°. 25 fr.

Pépratx (E.). — Vertébrés fossiles découverts par M. Eugène Pépratx au domaine de M^me^ V^e^ Jules Sauvy, près de Villeneuve-de-la-Raho. In-8°, 7 p. Perpignan, impr. de l'Indépendant. (6165)

Piette (E.). — Études d'ethnographie préhistorique. Les Plantes cultivées de la période de transition au Mas-d'Azil. In-8°, 24 p. avec fig. Paris, Masson et C^ie^ (Extr. de l'*Anthropologie*). (5782)

Pomel (A.). — Carte géologique de l'Algérie. Paléontologie; Monographies; les Éléphants quaternaires. In-4°, 68 p. et 15 planches. Alger, impr. Fontana et C^ie^. (9312)

Priem (F.). — L'enseignement de la géologie dans les lycées. In-8°, 7 p. Saint-Cloud, impr. Belin frères (Extr. de *l'Enseignement secondaire*). (9041)

Quesneville (G.). — De la double réfraction elliptique et de la tétraréfringence du quartz dans le voisinage de l'axe. In-8°, 34 p. avec fig. et planche. Paris, bureaux du *Moniteur scientifique*, 12, rue de Buci. (10754)

Ramond (G.). — Géologie des Indes anglaises (stratigraphie et tectonique), d'après la nouvelle édition de « A manual of the geology of India » (2^e^ édition 1893), élaboré par M. R.-D. Oldham, surintendant au « Geological Survey of India ». In-8°, 93 p. Paris, Comptoir géologique (Extr. de l'*Annuaire géologique universel*). (5790)

Renault (B.). — Note sur le genre Métacordaïte. In-8°, 17 p. av. fig. Autun, imp. Dejussieu père et fils (Soc. d'hist. nat. d'Autun). (8494)



Renault (B.). — Les Bactéries dévoniennes et le genre *Aporoxylon* d'Unger, communication faite à la séance de la Société d'histoire naturelle d'Autun, le 14 juin 1896. In-8°, 4 p. Autun, imp. Dejussieu. (9497)

Torgapel et Zacharewicz. — Carte agronomique des communes de Saint-Saturnin-d'Avignon et Jonquerettes. Notice explicative. In-8°, 19 p. Avignon, imp. Seguin. 1 fr. (9081)

### 4° *Mécanique appliquée et Machines.*

Bertin (L.-E.). — Chaudières marines. Cours de machines à vapeur, professé à l'École d'application du Génie maritime. Gr. in-8°, 440 p. avec fig. Paris, Bernard et C^ie^. 20 fr. (11670)

Chaudière mixte, système Solignac. In-4° à 3 col., 4 p. avec fig. Paris, 28, rue Saint-Lazare (Extr. de la *Revue industrielle*). (10641)

Conducteur (le) de moteurs à gaz et à pétrole. In-16, 160 p. avec fig. Paris, Bernard et C^ie^. 1^f^,50. (9405)

Dariès (G.). — Mécanique, hydraulique, thermodynamique. In-16, viii-376 p. avec fig. Paris, Dunod et Vicq. (7458)

Exposition internationale de Chicago en 1893. Rapports publiés sous la direction de M. Camille Krautz, commissaire général du gouvernement français. Comité 15 (1^er^ volume) : la Mécanique générale américaine à l'Exposition de Chicago. Rapport de M. *Gustave Richard*, ingénieur civil des mines, commissaire-rapporteur. Gr. in-8°, vii-634 p. avec fig. Paris, Imp. nationale. (Ministère du Commerce). (10441)

—— —— Comité 15 (2^e^ volume) : les Machines à bois américaines. Rapports de M. *Antoine Vautier*, administrateur-gérant de la Société Dandoy-Mailliard, Luck et C^ie^, commissaire-rapporteur. Gr. in-8°, 151 p. avec fig. Paris, Impr. nationale (Ministère du Commerce). (10674)

Farman (D.). — Les Automobiles, Voitures, Tramways et Petits Véhicules. In-18 jésus, vi-319 p. avec 112 fig. Paris, Fritsch. (8924)

Frein d'entraînement circulaire, semi-automatique Juhel. In-8°, 4 p. et planche. Paris et Nancy, Berger-Levrault et C^ie^ (Extr. de la *Revue d'artillerie*). (8671)

Marchand (E.). — Nouvelle théorie des pompes centrifuges (étude théorique et pratique). In-8°, 193 p. avec fig. Paris, Bernard et C^ie^. (9469)

MARCHAND (E.). — Une nouvelle pompe centrifuge pouvant produire un nouveau moyen de propulsion des bateaux par réaction hydraulique. In-8°, 88 p. et 2 pl. Paris, Bernard et Cie. (11572)

RINGELMANN. — Rapport sur les expériences effectuées à la station d'essais de machines agricoles (exercice 1893). In-8°, 37 p. avec fig. Paris, Imp. nationale (Extr. du *Bull. du Ministère de l'Agriculture*). (8501)

—— Machines employées en agriculture pour l'élévation des eaux. In-4°, 140 p. avec 150 fig. Paris, 33, rue Jean-Jacques-Rousseau. (12107)

SAUVAGE (E.). — La machine à vapeur. Traité général, contenant la théorie du travail de la vapeur, l'examen des mécanismes de distribution et de régularisation, la description des principaux types d'appareils, l'étude de la condensation et de la production de la vapeur. 2 vol. gr. in-8°, avec 1.036 fig. T. I, XLV-468-XI p.; t. II, 547 p. Paris, Baudry et Cie. (9066)

WALCKENAER (C.). — Les Trappes d'expansion de vapeur des fourneaux de chaudières. In-8°, 12 p. Paris, Dunod et Vicq. (Extr. des *Annales des Mines*). (8530)

WERHLIN (C.). — Les moteurs à gaz et les moteurs à pétrole à l'Exposition universelle de 1889. In-8°, 66 p. av. fig. Paris, Bernard et Cie. (9537)

### 5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

BORCHERS (W.). — Traité d'électrométallurgie (magnésium, lithium, glucinium, sodium, potassium, calcium, aluminium, cérium, lanthane, didyme, cuivre, argent, or, zinc, cadmium, mercure, étain, plomb, bismuth, antimoine, chrome, manganèse, fer, nickel, cobalt, platine, etc.). Traduit d'après la 2e édition allemande par le Dr *L. Gautier*. In-8°, II-488 p. avec 198 fig. et 3 pl. Paris, Baudry et Cie. (9391)

BRONGNIART (P.). — Monographie des explosifs. In-8°, 38 p. Nancy, impr. Berger-Levrault et Cie. (5639)

CADIAT (E.) et L. DUBOST. — Traité pratique d'électricité industrielle (Unités et mesures; Piles et Machines électriques; Éclairage électrique; Transmission électrique de l'énergie; Galvanoplastie et Électrométallurgie; Téléphonie). 5e édition avec 277 fig. dans le texte. In-8°, VI-730 p. Paris, Baudry et Cie. (7235)

CAMPREDON (L.). — Note sur le dosage du soufre dans les produits sidérurgiques (fers, aciers et fontes). In-8°, 15 p. avec fig. Paris, impr. Perret et Cie (Communication présentée au Congrès international de chimie appliquée). (11463)



CARLES (P.). — Titrage industriel de l'acide tartrique. In-8°, 11 p. Bordeaux, Feret et fils. 1 fr. (7009)

DEMENGE (E.). — Les Installations des nouvelles forges de Douai. In-8°, 24 p. avec fig. et planche. Paris, 6, rue de la Chaussée-d'Antin. (11957)

DUMONT (G.) et E. HUBOU. — Historique, Propriétés, Fabrication, Applications de l'acétylène. In-8°, 124 p. avec fig. Paris, 6, rue de la Chaussée-d'Antin. 3f,50. (11972)

FLOURENS (G.). — Résumé du rapport sur les travaux du premier Congrès international de chimie appliquée, tenu à Bruxelles en août 1894. In-8°, 13 p. Paris, impr. Davy (Extr. du journal *la Sucrerie indigène et coloniale*). (7942)

HOSPITALIER (E.). — Formulaire de l'électricien. In-18 jésus, 395 p. Paris, Masson et Cie. (6370)

JOANNIS (A.). — Traité de chimie organique appliquée. T. 2. In-8°, 722 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 15 fr. (L'ouvrage complet, 35 fr.) (12229)

LARBALÉTRIER (A.). — Les Résidus industriels employés comme engrais. Industries minérales et animales. In-16, 200 p. Paris, Masson et Cie; Gauthier-Villars et fils. 2f,50. (10720)

LEDEBUR (A.). — Le Fer et l'Acier : leurs emplois dans l'industrie, manuel à l'usage des constructeurs et des mécaniciens. Traduit de l'allemand par *Th. Seeligmann*, chimiste industriel. In-18 jésus, XII-179 p. Paris, Fritsch. (5744)

LOPPÉ (F.). — Les Accumulateurs électriques. In-16, 204 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils; Masson et Cie. 2f,50. (10734)

MATHET (L.). — L'Éclairage à l'acétylène. Construction pratique et Installation à la portée de tous d'un appareil pour cet éclairage. In-8°, 16 p. et pl. Paris, Mendel. (12049)

MONTPELLIER (J.-A.). — Les Accumulateurs W.-A. Boese. In-8°, 16 p. avec fig. Paris, impr. de Soye et fils (Extr. de l'*Electricien*). (9010)

PERRODIL (C. DE). — Fabrication industrielle du carbure de calcium et de l'acétylène. In-8°, 49 p. et planche. Paris, 10, cité Rougemont (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils de France*). (12259)

PIÉRART (A.). — Note sur une installation d'éclairage et de transport de puissance électriques exécutée par les ateliers Sautter, Harlé et Cie. In-8°, 16 p. avec fig. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (8483)

Piérart (A.). — Les Accumulateurs électriques et leur emploi. In-8°, 40 p. avec fig. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (9940)

Prost (E.) et V. Hassreidter. — Manuel de chimie analytique appliquée aux industries du zinc et de l'acide sulfurique. In-8°, II-130 p. Paris, Baudry et Cie. (6630)

Riche (A.) et G. Halphen. — Le Pétrole (exploitation, raffinage, éclairage, chauffage, force motrice). In-18 jésus, VI-484 p. avec 114 fig. Paris, J.-B. Baillière et fils. (7591)

Sageret (J.). — Les Applications de l'électricité. Transformations de l'énergie électrique. In-8° carré, 351 p. avec fig. Paris, May. (11621)

Schweitzer (C.). — Distribution électrique de lumière et de force à Briançon. In-8°, 36 p. avec 22 fig. et 1 planche. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (5562)

Seyewetz (A.) et P. Sisley. — Chimie des matières colorantes artificielles. 2e fascicule : Matières colorantes azoïques (deuxième partie) ; Matières colorantes hydrazoniques ; Matières colorantes nitrosées ou quinones oximes ; Oxyquinones (couleurs dérivées de l'anthracène). In-8°, p. 153 à 336. Paris, G. Masson. (8782)

—— —— 3e fascicule : Matières colorantes dérivées du di et du triphénylméthane. In-8°, p. 337 à 472. Paris, G. Masson. (9729)

Talansier (C.). — Obus calorimétrique pour l'estimation de la valeur des combustibles solides, liquides et gazeux, méthode de M. Berthelot; Pouvoir calorifique des combustibles ; Détermination par l'appareil de M. P. Mahler. In-8°, 20 p. avec fig. Paris, Pichon. (5828)

Thompson (S.-P.). — Courants polyphasés et alterno-moteurs. Traduction par *E. Boistel*, ingénieur-expert près le tribunal de la Seine. In-8°, XII-298 p. avec fig. Paris, Baudry et Cie. (6675)

Tiffereau (T.). — L'Art de faire de l'or. La Transmutation du fer, du cuivre et de l'argent en or. In-8°, 39 p. Paris-Grenelle, l'auteur, 130, rue du Théâtre. 2 fr. (5574)

### 6° *Exploitation des mines. — Gites minéraux.*

Allard. — Une explosion de 1.750 kilogrammes de dynamite au fort du Larmont inférieur en 1877. In-8°, 12 p. avec grav. et planche. Nancy, imp. Berger-Levrault et Cie. (8296)

Babu (L.). — Les Mines d'or de l'Australie (province de Victoria) et le Gite d'argent de Broken-Hill (Nouvelle-Galles du Sud). In-8°, 86 p. avec fig. Paris, Ve Dunod et Vicq (Extr. des *Annales des Mines*). (6283)



Cambessedès (F.). — Accidents de mines. Paris. In-4°. 10 fr.

Carte commerciale et minière des pays sud-africains (Transvaal, Orange, colonies anglaises du Cap et de Natal, colonie portugaise de Mozambique, Rhodesia, Nyassaland, etc.), dressée par *F. Bianconi*. Gravée par M. Perrin. Paris, F. Bianconi. (979)

Carte des mines d'or en exploitation dans le district de Witwatersrand (Transvaal), dressée d'après les documents les plus récents par *F. Bianconi*, ingénieur géographe. Paris, Monrocq. (1003)

Carte du bassin houiller du Pas-de-Calais (région levant), à l'échelle de 1/40.000 (août 1895), par *A. Soubeiran*. Paris, impr. Erhard frères. (1243)

Lasne (H.). — Étude sur les phosphates naturels (origine, gisement, composition, exploitation). Rapport présenté au Congrès international de chimie appliquée (juillet-août 1896). In-8°, 68 p. Paris, impr. Perret et Cie. (8434)

Mallat (A.). — Les Eaux minérales naturelles du bassin de Vichy (Noms des sources ; Dates de leur captage ; Modes d'arrivée de l'eau, etc.). In-4°, 8 p. Vichy, impr. Bougarel. (11313)

Manuel des mines d'or (République sud-africaine; Transvaal; Autres pays de l'Afrique ; Australie ; Amérique ; Pays divers). In-18 jésus, LIX-359 p. Paris, 50, rue de la Chaussée-d'Antin. 3f,50. (6590)

Notice sur les eaux minérales de Lamalou-le-Haut, faite à l'aide des notes de MM. les ingénieurs de Cizancourt et Clément, des notes et ouvrages de MM. le Dr Moitessier, Filhol, professeurs, des Drs Boissier et Belugou. In-8°, 52 p. Montpellier, impr. Firmin et Montane. (9297)

Petit (P.). — Note sur un auto-capteur ou appareil servant à effectuer automatiquement de façon continue des prises d'air grisouteux ou de gaz quelconque. In-8°, 11 p. Paris, Ve Dunod et Vicq (Extr. des *Annales des Mines*). (6617)

Sarrau. — Accidents survenus par suite d'explosion tardive de cartouches de grisoutine. In-8°, 11 p. Paris, Ve Ch. Dunod et P. Vicq (Extr. des *Annales des Mines*). (11821)

Statistique de l'industrie minérale de la France. Tableaux comparatifs de la production des combustibles minéraux, des fontes, fers et aciers en 1894 et en 1895. In-8°, 12 p. Paris, Ve Dunod et Vicq (Extr. des *Annales des Mines*). (5822)

### 7° *Construction. — Chemins de fer.*

Barbey (C.). — Les locomotives suisses. Paris. In-4°. 75 fr.

Description et Instruction sur le montage et la manœuvre du frein à vide non automatique (système Hardy) pour chemin de fer d'intérêt local. In-8°, 15 p. Paris, Compagnie du frein à vide, 15, rue Portalis. (6339)

Dubois (J.). — Notice sur les constructions en ciment armé. In-8°, 52 p. avec fig. Mâcon, impr. Protat frères. (5984)

Durcissement de la pierre au moyen de fluosilicates ; par *L. B.* In-8°, 3 p. Nancy, impr. Berger-Levrault et C^ie^ (Extr. de la *Revue du Génie militaire*). (5996)

Flamant (A.). — Stabilité des constructions ; Résistance des matériaux. 2^e^ édition, revue et augmentée. In-8°, 482 p. avec fig. Paris, Baudry et C^ie^. (8395)

Gaunin (J.), L. Houdaille et A. Bernard. — Tables pour le tracé des courbes de chemins de fer, routes et canaux. Première partie : Tables trigonométriques ; deuxième partie : Recueil de coordonnées. In-8°, xxvi-176 p. Paris, V^ve^ Ch. Dunod et P. Vicq. (9861)

Grille et Laborde. — Les Travaux publics aux États-Unis. Gr. in-8°, 244 p. et album in-4° de 111 planches. Paris, Bernard et C^ie^ (*Revue technique de l'Exposition universelle de Chicago en* 1893). (9446)

Grimmeissen (C.). — Tables pour le tracé des courbes circulaires de raccordement des voies de communication. In-18, xl-337 p. avec fig. Le Faouët (Morbihan), l'auteur. (9865)

Marchena (E. de). — La Traction électrique des chemins de fer. In-8°, 121 p. Paris, Bernard et C^ie^ (Extr. des *Mém. de la Soc. des ingénieurs civils de France*). (10737)

Martinez (J.). — Étude sur les constructions en béton de ciment armé, système Hennebique, communication présentée au congrès des architectes français, tenu à Paris en juin 1896. In-8°, 57 p. avec fig. Paris, Dumesnil, 129, rue Marcadet. (7135)

Mauriac (E.). — Mesures à prendre pour empêcher la propagation des maladies contagieuses par les wagons de chemins de fer. In-8°, 16 p. Bordeaux, imp. Gounouilhou. (9277)

Ocagne (M. D'). — Application générale de la nomographie au calcul des profils de remblai et déblai, avec une instruction pratique pour la construction et le mode d'emploi des abaques à points isoplèthes. In-8°, 80 p. avec fig. Paris, V^ve^ Dunod et Vicq. (8269)

Statistique des chemins de fer français au 31 décembre 1894. Documents divers. Première partie : France (intérêt général). In-4°, vi-292 p. Paris, Imp. nationale, 5 fr. (Ministère des Travaux publics). (8516)

—— —— Deuxième partie : France (intérêt local) ; Algérie et Tunisie. In-4°, vi-338 p. Paris, Imp. nationale. 5 fr. (Ministère des travaux publics). (11835)

Villars (A.). — Les Tramways électriques à Amiens. In-8°, 27 p. Amiens, imp. Jeunet. (5835)



### 8° *Législation. — Économie politique et sociale.*

Aynard. — Travail des enfants, des filles mineures et des femmes dans les établissements industriels. Discours prononcé dans la séance de la Chambre des députés du 25 juin 1896. In-16, 64 p. Paris, Impr. des journaux officiels (Extr. du *Journal officiel*). (6965)

Caire (C.). — La législation sur le travail industriel des femmes et des enfants (thèse). In-8°, 343 p. Paris, Arthur Rousseau. (9573)

Chailley-Bert (J.) et A. Fontaine. — Lois sociales. Recueil des textes de la législation sociale de la France. Premier supplément, donnant les textes de 1895. In-8°, 36 p. Nancy, Berger-Levrault et C^ie^ ; Paris, Chailley. (8348)

Décret relatif à l'exploitation des phosphates de chaux en Algérie. Arrêté portant désignation du service des douanes pour la perception du droit sur l'exploitation des phosphates de chaux. Arrêté portant désignation de douars et tribus contenant des phosphates de chaux susceptibles d'être exploités. In-8°, 12 p. Alger, impr. Fontana et C^ie^. 1 fr. (5390)

Esnault (H.). — Rapports financiers de l'État et des Compagnies de chemins de fer (thèse). In-8°, 193 p. Paris, Arthur Rousseau. (9427)

Gabriel (G.). — De la responsabilité des patrons dans les accidents du travail. In-8°, xi-287 p. Nancy, impr. Crépin-Leblond. (6794)

Gruner (E.). — La loi sur les caisses de retraite des ouvriers mineurs, rapport présenté par M. *E. Gruner*, ingénieur civil des mines, secrétaire du comité central des houillères de France. Suivi des observations de M. *Darcy*, président du

comité central des houillères de France, et M. *Ledoux*, ingénieur en chef des mines. In-8°, 23 p. Paris, 54, rue de Seine; 3, rue Scribe (Extr. de *la Réforme sociale*). (9447)

Lanoir (P.). — La Question des chemins de fer. Les Accidents des chemins de fer. In-16, 71 p. Paris, Savine. 1f,50. (7305)

Lewy (E.). — La Réglementation de la production de charbon au Congrès international des mineurs de Paris (la Journée de huit heures; le Minimum du salaire; la Participation aux bénéfices. In-8°, 144 p., Paris, Leroy. 2fr,50. (6388)

Protat (E.). — Litiges et Réclamations en matière de transports par chemins de fer. Commentaire pratique de la loi du 11 avril 1888, modifiant les articles 105 et 108 du Code de commerce. 4e édition. In-8°, 104 p. Paris, Chaix. (12266)

Question sociale. La Responsabilité civile des patrons dans les accidents du travail. Une solution juste. In-16, 7 p. Paris, impr. Balitout (Extr. du *Journal des chambres de commerce*). (11610).

Robert (C.) et E. Cheysson. — La loi du 27 décembre 1895 sur les caisses de retraite des employés et ouvriers. Observations de MM. *Charles Robert*, ancien conseiller d'État, et *Emile Cheysson*, inspecteur général des Ponts et Chaussées. In-8°, 40 p. Paris, Chaix; secrétariat du comité des accidents du travail, 20, rue Louis-le-Grand (Extr. du *Bull. du comité des accidents du travail*). (5802)

Rochetin (E.). — Les Assurances ouvrières. Mutualités contre la maladie, l'incendie et le chômage. In-18 jésus, III-288 p. Paris, Guillaumin et Cie. 3fr,50. (9960)

Tarbouriech (E.). — La Responsabilité des accidents dont les ouvriers sont victimes dans leur travail : histoire, jurisprudence et doctrine, bibliographie, travaux parlementaires jusqu'à la date du 24 mars 1896. In-8°, XV-517 p. Paris, Giard et Brière. 10 fr. (7866)

*Objets divers.*

Bouquet de La Grye. — Note sur la décimalisation du temps et de la circonférence, présentée au Congrès national de géographie tenu à Lorient. In-8°, 10 p. Paris, impr. Noizette et Cie. 50 cent. (11474)

Campredon (E.). — Organisation des services de travaux publics en France. In-16, VIII-416 p. Paris, Dunod et Vicq. (7436)

Exposition internationale de Chicago en 1893. Rapports publiés sous la direction de M. Camille Krantz, commissaire général du gouvernement français. Commissariat spécial des colonies, de la Tunisie et de l'Algérie : l'Agriculture et les Instruments agricoles à l'Exposition de Chicago. Rapport de M. *C. Burgart*, ingénieur des arts et manufactures, commissaire-rapporteur. Gr. in-8°, 87 p. Paris, Imprim. nationale (Ministère du Commerce). (10442)

Faye (H.). — Sur l'origine du monde. Théories cosmogoniques des anciens et des modernes. 3e édition. In-8°, XI-314 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars et fils. 6 fr. (10901)

Lechalas (G.). — Etude sur l'espace et le temps. In-18 jésus, 205 p. Paris, F. Alcan. (10958)

Messoyédoff (P. de). — Les Écoles techniques fondées en Russie dans le but de former des agents techniques de degré inférieur pour les chemins de fer et autres services spéciaux du ressort du ministère russe des voies de communications. Communication faite au troisième Congrès international de l'enseignement technique, tenu à Bordeaux en septembre 1895. In-8°, 12 p. Bordeaux, impr. Gounouilhou (Société philomathique de Bordeaux, extr. du Compte rendu général du congrès). (9283)



## OUVRAGES ANGLAIS.

### 1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

Cayley (A.). — Collected Mathematical Papers. Vol. II. In-4°. Cambridge University Press. 31f,25.

Greenhill. — Differential and Integral Calculus. With Applications. In-8°, 472 p. Macmillan. 13f,15.

Minchin (G.-M.). — A Treatise on Statics. With Applications to Physics. 5th ed. Vol. 1, Equilibrium of Coplanar Forces. In-8°, 416 p. Clarendon Press. 13f,15.

Routh (E.-J.). — A Treatise on Analytical Statics. With numerous Examples. 2nd ed. Vol. 1. In-8°, 404 p. Cambridge University Press. 17f,50.

### 2° *Physique et Chimie.*

Andrews (T.). — Thermo-Electric Reactions and Currents between Metals in Fixed Salts. In-8°, 18 p. Spons. 1f,25.

Babbitt (E.-D.). — The Principles of Light and Colour. Including, among other things, the Harmonic Laws of the Universe, etc. 2nd ed. In-8°, 578 p. Paul, Trübner and Co. 26f,25.

Clowes (F.). — Detection and Measurement of Inflammable Gas and Vapour in the Air. With a Chapter on the Detection and Measurement of Petroleum Vapour, by *Beverton Redwood*. In-8°, 214 p. Crosby Lockwood and Son. 6f,25.

Emtage (W.-T.-A.). — Light. With 231 Illusts. In-8°, 360 p. Longmans. 7f,50.

Masson (O.). — The Classification of the Chemical Elements. In-8°, Macmillan. 1f,90.

Muir (M.-M.-P.). — The Story of the Chemical Elements. In-18, 190 p. G. Newnes. 1f,25.

Newth (G.-S.). — Chemical Lecture Experiments. Non-Metallic. New and Enlarged ed. In-8°, 352 p. Longmans. 13f,15.

Nichols (E.-L.) and W.-S. Franklin. — The Elements of Physics. Vol. 1 : Mechanics and Heat. Londres. In-8°, 240 p. 9 fr. (Paraîtra en 3 volumes).

Norrie (H.-S.). — Ruhmkorff Induction-Coils : Their Construction. In-18, 192 p. Spons. 2f,50.

Ramsay (W.). — The Gases of the Atmosphere : The History of their Discovery. With Portraits. In-8°, 248 p. Macmillan. 7f,50. —— The Position of Argon and Helium Among the Elements. In-8°, 52 p. Clarendon Press. 1f,25.

Sutton (F.). — A Systematic Handbook of Volumetric Analysis ; or A Quantitative Estimation of Chemical Substances by Measure, Applied to Liquids, Solids and Gases. 7th ed., Enlarged and Improved. In-8°, 600 p. Churchill. 23f,15.

Thompson (E.-P.) and Anthony (W.-A.). — Roentgen Rays and Phenomena of the Anode and Cathode Principles. In-8°, 208 p. Spons. 9f,40.

### 3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Buffum (W.-A.). — The Tears of the Heliades; or Amber as a Gem. With Illusts. In-8°, xxiv-98 p. Low. 6f,25.



Geikie (J.). — Outlines of Geology : An Introduction to the Science for Junior Students and General Readers. 3rd ed., Revised. 400 Illusts. In-8°, 436 p. Stanford. 15 fr.

Heilprin (A.). — The Earth and its Story : A First Book of Geology. Illust. In-8°, 267 p. Gay and Bird. 6f,25.

Miers (H.-A.). — Individuality in the Mineral Kingdom : An Inaugural Lecture Delivered at the University Museum, Oxford, on May 20, 1896. In-8°, 26 p. Simpkin. 1f,25.

Transactions of the Geological Society of South Africa. In-8°. Vol. 1, n° 1, 140 p. With Maps ; 7f,50. Vol. 2. Parts 1 and 2, 32 p. With Maps ; 3f,75. Paul, Trübner and Co.

Woods (H.). — Elementary Palæontology : Invertebrate. 2nd ed. In-8°, 310 p. Cambridge University Press. 7f,50.

Woodward (C.-J.). — Crystallography for Beginners, With an Appendix on the Use of the Blowpipe and the Determination of Common Minerals. After the Method of Dr. Albin Weisbach. Illust. In-8°, vi-164 p. Simpkin. 5f,65.

### 4° *Mécanique appliquée et Machines.*

Carter (E.-T.). — Motive Power and Gearing for electrical Machinery. Londres. In-8°, 642 p. 18f,75.

Clerk (D.). — The Gas and Oil Engine. 6th ed., Revised and enlarged. In-8°, 570 p. Longmans. 18f,75.

Donkin (B.). — A Text-Book on Gas, Oil and Air Engines ; or, Internal Combustion Motors without Boiler. With 154 Illusts. and Selected Table of Trials. 2nd ed., Revised and Largely Re-written. In-8°, 524 p. C. Griffin. 31f,25.

Haeder (H.). — A Handbook on the Steam Engine. Trans. from the German, with Considerable Additions and Alterations, by *H. H. Powles*. 2nd English ed., revised. In-8°, 462 p. Crosby Lockwood and Son. 11f,25.

Hutton (W.-S.). — The Practical Engineer's Handbook. Comprising a Treatise on Modern Engines and Boilers, Marine, Locomotive and Stationary. With upwards of 370 Illusts. 5th ed. Carefully Revised, with Additions. In-8°, 492 p. Crosby Lockwood and Son. 22f,50.

Norris (W.). — A Practical Treatise on the « Otto » Cycle Gas Engine. In-8°, 263 p. Longmans. 13f, 15.

Seaton (A.-E.). — A Manual of Marine Engineering : Comprising the Designing, Construction and Working of Marine Machinery.

With numerous Tables and Illusts. Reduced from Working Drawings. 13th ed., revised throughout and enlarged. In-8°, 606 p. C. Griffin. 26f,25.

Sennett (A.-R.). — Carriages Without Horses Shall Go : Being a Reprint of a Paper on Horseless Road Locomotion Read before Section G. of the British Association, Liverpool, September 23rd, 1896. To which is Added Remarks on the Future of Horseless Road Locomotion, Notes on the New Enactment, the Locomotives ou Highways Acts, 1896, Evolution in Modes of Travel, the Engineer Competition, 1897, the Local Government Board Regulations and other Matter. Illust. In-8°, xvi-131 p. Whittaker. 2f,50.

Tayler (A.-J.-W.). — Bearings and Lubrification : A Handbook for Every User of Machinery. Illust. In-8°, viii-208 p. W. Rider and Sons. 4f,40.

Traill (T.-W.). — Boilers : Marine and Land. 3rd ed. With Illusts. In-8°, 600 p. C. Griffin. 15f,65.

### 5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

Bottone (S.-R.). — Electro-Motors : How Made and How Used. A Handbook for Amateurs and Practical Men. With 86 Illusts. 3rd ed., revised and enlarged. In-8°, 176 p. Whittaker. 3f,75.

—— How to Manage the Dynamo : A Handbook for Ship Engineers, Electric Light Engineers and Electro Platers. 2nd ed., revised and enlarged. In-8°, 52 p. Whittaker. 1f,25.

Brannt (W.-T.). — The Metallic Alloys : A Practical Guide for the Manufacture of all Kinds of Alloys, Amalgams and Solders Used by Metal Workers. Together with their Chemical Properties and their Application in the Arts and the Industries. With an Appendix on the Colouring of Alloys and the Recovery of Waste Metals. Illust. by 34 Engravings. A new, revised and enlarged ed. In-8°, 556 p. Low. 26f,25.

Campbell (H.-H.). — The manufacture and Properties of structural Steel. Londres. In-8°, 400 p. avec fig. 30 fr.

Carter (E.-T.). — Motive Power and Gearing for Electrical Machinery : A Treatise on the Theory and Practice of the Mechanical Equipment of Power Stations for Electrical Supply and for Electric Traction. In-8°, 642 p. Electrician Pubg. Co. 15f,65.

Eissler (M.). — Metallurgy of Gold. 4th ed., enlarged. With about



250 Illusts. and numerous Folding Plates. In-8°, 704 p. Crosby Lockwood and Son. 20 fr.

Eissler (M.). — A Handbook of Modern Explosives : A Practical Treatise on the Manufacture and Use of Dynamite, Gun-Cotton, Nitro-Glycerine and other Explosive Compounds, including Collodion-Cotton. With Chapters on Explosives in Practical Application. 2nd ed., Enlarged. With 150 Illusts. In-8°, 426 p. Crosby Lockwood and Son. 15f,65.

Frith (G.) and Rawson (W.). — Coil and Current ; or The Triumphs of Electricity. With Illusts. In-8°, viii-294 p. Ward, Lock and Co. 4f,40.

Hawkins (C.-C.) and Wallis (F.). — The Dynamo : Its Theory, Design and Manufacture. With 190 Illusts. 2nd ed., revised. In-8°, 540 p. Whittaker. 13f,15.

Jackson (D.-C.) and Jackson (J.-P.). — Alternating Currents and Alternating Current Machinery : Being Vol. 2 of the Text-Book on Electro-Magnetism and the Construction of Dynamos. In-8°, 748 p. Macmillan. 17f,50.

Johnson (J.-C.-F.). — Getting Gold : A Practical Treatise for Prospectors, Miners and Students. With Illusts. In-8°, 216 p. C. Griffin. 4f,40.

Joyce (S.). — Examples in Electrical Engineering. In-8°, 248 p. Longmans. 6f,25.

Kapp (C.). — Transformers for Single and Multiphase Currents : A Treatise on their Theory, Construction and Use. Trans. from the German by the Author. With 133 Illusts. In-8°, xii-241 p. Whittaker. 7f,50.

Manual of Electrical Undertakings, 1896. Compiled Under the Direction of *Emile Garcke*. In-8°, 410 p. P.-S. King and Son. 6f,25.

Rose (T.-K.). — The Metallurgy of Gold : Being One of a Series of Treatises on Metallurgy Written by Associates of the Royal School of Mines. Edit. by Professor *W.-C. Roberts-Austen*. With numerous Illusts. 2nd ed. In-8°, 514 p. C. Griffin and Co. 26f,25.

Sanford (P.-G.). — Nitro-Explosives : Properties, Manufacture and Analysis of smokeless Powders, Celluloid, Fulminates and other Nitrated Substances. Londres. In-8°, 282 p. 13f,50.

Walker (S.-F.). — Electric Lighting for Marine Engineers ; or, How to Light a Ship by the Electric Light and How to Keep the Apparatus in Order. With 103 Illusts. 2nd ed. In-8°, 314 p. Tower Publishing Co. 6f,25.

### 6° *Exploitation des mines. — Gites minéraux.*

Bulman (H.-F.) and Redmayne (R.-A.-S.). — Colliery Working and Management : Comprising the Duties of a Colliery Manager, the Superintendence and Arrangement of Labour and Wages, and the Different Systems of Working Coal Seams. With Underground Photographs and numerous other Illusts. In-8°, 346 p. Crosby Lockwood and Son. 18f,75.

Hughes (H.-W.). — A Text-Book of Coal Mining. For the Use of Colliery Managers and Others. 3rd ed. With very numerous Illusts. In-8°, 450 p. C. Griffin. 22f, 50.

*Parliamentary*. — Mineral Statistics of the United Kingdom for 1895, with Appendix. 2f,05.

—— Mines. List of Mines Worked in 1895. 4f,10.

—— —— Reports on the Tylorstown Colliery Explosion by *R. Woodfall* and *J.-T. Robson*, H. M. Inspectors of Mines. Plans and Diagrams. 2 fr.

—— —— Causes of Death in Colliery Explosions and Underground Fires. Report by *J. Haldane*, M. D. Couloured Plans and Diagrams. 2f,20.

—— —— Summaries of Statistics for 1895. 0f,65.

—— —— Brancepeth Colliery Explosion 13th April, 1896. Report. Plan. 1f,25.

—— —— Micklefield Colliery Explosion, 30th April, 1896. Report. Plan. 0f,85.

—— Mines and Quarries. Second Annual General Report upon the Mineral Industry of the United Kingdom for the Year 1895. 4f,10.

—— Newfoundland. Report on the Mineral Resources of the Colony. With 5 Coloured Maps. 1f,25.

Phillips (J.-A.). — A Treatise on Ore Deposits. 2nd ed. Re-written and Greatly Enlarged by *Henry Louis*. With numerous Illusts. In-8°, 958 p. Macmillan. 35 fr.

Skinner (W.-R.). — Mining Manual for 1896. In-8°, 1.404 p. Skinner. 18f,75.

Russell (M.). — Mount Lyell Mines, Tasmania. With Views and Maps of the Lyell Mines. In-8°, 184 p. E. Wilson. 26f,25.

### 7° *Construction. — Chemins de fer.*

Glover (J.). — Formulæ for Railway Crossings and Switches. In-32, 28 p. Spons. 3f,15.



Johnston (F.-R.). — Practical Hints for Light Railways at Home and Abroad. Plates. In-8°. Spons. 3f,15.

*Parliamentary*. — Railway Accidents. Returns and Inspectors' Reports for Jan.-March. 0f,95.

—— Railways. Accidents. Returns and Inspectors' Reports, Jan.-June, 1896. 0f,75.

—— —— Continuous Brakes. Returns for July-Dec., 1895. 1f,25.

—— —— Continuous Brakes. Return for Jan.-June, 1896. 1f,25.

—— —— Returns of the United Kingdom for 1895. 1f,15.

—— —— Signal Arrangements. Returns for 1895. 1f,05.

Reynolds (M.). — The Model Locomotive Engineer, Fireman and Engine-Boy. Comprising a Historical Notice of the Pioneer Locomotive Engines and their Inventors. New ed., with Revised Appendix. In-12, 272 p. Crosby Lockwood and Son. 4f,40.

Stretton (C.-E.). — The Locomotive Engine and its Development. A Popular Treatise on the Gradual Improvements made in Railway Engines between 1803 and 1896. With Illusts. 5th ed., revised and enlarged. In-8°, 252 p. Crosby Lockwood and Son. 4f,40.

### 8° *Objets divers.*

Adams (J.-C.). — Scientific Papers. Vol. I. Edit. by *W.-G. Adams*, and Memoir by *J. W. L. Glaisher*. In-4°, 556 p. Cambridge University Press. 31f,25.

Sexton (A.-H.). — Fuel and Refractory Materials. In-8°, 352 p. Blackie. 6f,25.

Thomas (D.-A.). — Some Notes on the Present State of the Coal Trade in the United Kingdom. With Special Reference to that of South Wales and Monmouthshire, together with a Proposal for the Prevention of Undue Competition and for Maintaining Prices at a Remunerative Level. In fol., 85 p. Cardiff, Western News Office. Whittaker. 6f,25.

Wells (S.-H.). — A Text-Book of Engineering, Drawing and Design : Including Practical Geometry, Plane and Solid, and Machine and Engine Drawing and Design. With Illusts, Folding Plate and numerous Examples. Specially intended for the Use of Students of Technical School and Colleges. Part 2, Machine and Engine Drawing and Design. 2nd ed. In-8°, 184 p. C. Griffin. 5f,65.

## OUVRAGES AMÉRICAINS.

Bulletin of the United States Geological Survey. — No. 123, A Dictionary of Geographic Positions. — No. 124, Revision of the American Fossil Cockroaches. With Descriptions of New Forms. — No. 125, The Constitution of the Silicates. — No. 126, A Mineralogical Lexicon of Franklin, Hampshire and Hampden Counties, Massachusetts. — No. 128, The Bear River Formation and its Characteristic Fauna. — No. 129, Earthquakes in California in 1894. — No. 131, Report of Progress of the Division of Hydrography for the Calendar Years 1893 and 1894. — No. 132, The Disseminated Lead Ores of South-eastern Missouri. — No. 133, Contributions to the Cretaceous Paleontology of the Pacific Coast. The Fauna of the Knoxville Beds. — No. 134, The Cambrian Rocks of Pensylvania. — Illust. In-8°. Washington, Government Printing Office.

Gemmell (G.-H.). — Chemical Notes on Equations, Inorganic and Organic. In-12, 254 p. New-York, W. Wood and Co. 11f,90.

Merriman (M.) and Woodward (R.). — Higher Mathematics. In-8°, xi-576 p. New-York. 31f,25.

Powell (J.-W.). — Fifteenth Annual Report of the United States Geological Survey to the Secretary of the Interior, 1893-94. Maps. Illust. In-4°, xiv-755 p. Washington, Government Printing Office.

Rothwell (R.-P.). — The Mineral Industry, its Statistics, Technology and Trade in U.-S. and other Countries. Vol. IV. In-8°, 840 p. New-York, Scientific Publishing Co. 37f,50.

Trowbridge (J.). — What is Electricity ? In-12, 320 p. New-York, Appleton. 9f,40.

Walcott (C.-D.). — Sixteenth Annual Report of the United States Geological Survey to the Secretary of the Interior, 1894-95. In 4 Parts. Part. I, Director's Report and Papers of a Theoretic Nature. Part. 2, Papers of an Economic Character. Part. 3, Mineral Resources of the United States, 1894 : Metallic Products. Maps, Plans and Illusts. In-4°. Washington, Government Printing Office.



## OUVRAGES SUISSES.

Kissling (E.). — Die Fauna des Mittel-Oligocäns im Berner-Jura (Ostrakoden von *E. Lienenklaus*) (Extr. des *Abhandl. d. schweizer. paläont. Gesellschaft*). Zürich. In-4°, 74 p. av. 9 pl. 16 fr.

De Loriol (P.). — Étude sur les mollusques du Rauracien supérieur du Jura bernois. Accompagnée d'une notice stratigraphique par *E. Koby*. 1er suppl. (Extr. des *Mém. de la Société paléont. suisse*). Genève. In-4°, 51 p. av. 10 pl. 17 fr.

Wyssling (W.) und E. Blattner. — Beschreibende Notizen über eine Anzahl bemerkenswerte Elektrizitätswerke in der Schweiz. Zürich, Zürcher und Furrer. In-4°, 106 p. av. fig. et 107 pl. 12f,50.

## OUVRAGES ALLEMANDS.

### 1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

Bendt (F.). — Katechismus der Differential- und Integralrechnung. Leipzig, I.-I. Weber. In-12, xvi-268 p. av. 39 fig. 3f,75. (4342).

Binder (W.). — Theorie der unicursalen Plancurven 4. bis 3. Ordnung in synthetischer Behandlung. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, xi-396 p. av. 65 fig. dans le texte et sur 2 pl. 15 fr. (4344)

Boehm (K.). — Allgemeine Untersuchungen über die Reduction partieller Differentialgleichungen auf gewöhnliche Differentialgleichungen. Mit einer Anwendung auf die Theorie der Potentialgleichungen. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, iii-58 p. 2f,50. (3542)

Dedoff (T.). — Untersuchungen über quadratische Formen. Leipzig, B.-G. Teubner. In-4°, 39 p. 3f,50. (3549)

Goebel (K.) — Die Zahl und das Unendlichkleine. Leipzig, G. Fock. In-8°, 47 p. 1f,50. (3203)

Hollender (H.-J.). — Ueber eine neue graphische Methode der Zusammensetzung von Kräften und ihre Anwendung zur graphischen Bestimmung von Inhalten, Schwerpunkten, statistis-

chen Momenten und Trägheitsmomenten ebener Gebilde. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, VI-44 p. av. 4 pl. 3f,75. (2021)

LIE (S.). — Geometrie der Berührungstransformationen. Dargestellt von *L.* und *G. Scheffers*. I. Bd. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, XI-694 p. av. fig. (Paraîtra en 2 vol.). 30 fr. (2026)

LILIENTHAL (R. v.). — Grundlagen einer Krümmungslehre der Curvenscharen. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, VII-114 p. 6f,25. (3964)

MINKOWSKI (H.). — Geometrie der Zahlen. 1. Lfg. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, 240 p. (Paraîtra en 2 livraisons). 10 fr. (2033)

ROHN (K.) und E. PAPPERITZ. — Lehrbuch der darstellenden Geometrie. II. Bd. Leipzig, Veit und Co. In-8°, XVI-528 p. av. fig. 17f,50. (2467)

SCHEFFLER (H.). — Das Wesen der Mathematik und der Aufbau der Welterkenntniss auf mathematischer Grundlage. 2 Bde. I. Die Mathematik. II. Das Weltsystem. Brunswick, F. Wagner. In-8°, VI-409 p. et V-462 p. av. 1 et 2 pl. 12f,50. (3577)

SCHLEGEL (V.). — Die Grasmmann'sche Ausdehnungslehre. Ein Beitrag zur Geschichte der Mathematik in den letzten 50 Jahren. (Extr. de la *Zeitschrift für Mathematik und Physik*). Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, 44 p. 2f,50. (2040)

STAHL (H.). — Theorie der Abel'schen Functionen. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, X-354 p. 15 fr. (3978)

STOLZ (O). — Grundzüge der Differential und- Integralrechnung. I. u. II. Thl. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, X-460 p. et VII-338 p. av. 4 et 33 fig. Chaque partie 10 fr. (2042)

STURM (R.). — Die Gebilde I. und 2. Grades der Liniengeometrie in synthetischer Behandlung. III. Thl. Die Strahlencomplexe 2. Grades. Leipzig, B.-G. Teubner. In-8°, XXIV-518 p. (Fin). 22f,50. (3981)

WEBER (H.). — Lehrbuch der Algebra. II. Bd. Brunswick, F. Vieweg und Sohn. In-8°, XIV-796 p. 25 fr. (3217)

### 2° *Physique et Chimie.*

BENISCHKE (G.). — Magnetismus und Elektrizität mit Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Berlin, J. Springer. In-8°, XIII-272 p. av. 202 fig. 7f,50. (3413)

BIECHELE (M.). — Anleitung zur Erkennung, Prüfung und Wertbestimmung der gebräuchlichsten Chemikalien für den technischen, analytischen und pharmaceutischen Gebrauch. Berlin, J. Springer. In-12, VI-548 p. 6f,25. (3541)



COHEN (E.). — Studien zur chemischen Dynamik, nach J. H. van't Hoff's Études de dynamique bearbeitet. Mit einem Vorwort von *J. H. van't Hoff*. Amsterdam, F. Müller und Co. In-8°, VII-VI-282 et 8 p. avec 49 fig. dans le texte. 7f,50. (2010)

DRUDE (P). — Zur Theorie stehender elektrischer Drahtwellen. (Extr. des *Abhandl. d. k. sächs. Gesellsch. der Wissenschaften.*) Leipzig, S. Hirzel. In-8°, 110 p. av. 1 pl. 6f,25. (3551)

EBERT (H.). — Magnetische Kraftfelder. Die Erscheinungen des Magnetismus, Elektromagnetismus und der Induktion, dargestellt auf Grund des Kraftlinien-Begriffes. I. Tl. Leipzig, J.-A. Barth. In-8°, XVIII-223 p. av. 93 fig. dans le texte et sur 2 pl. 10 fr. (2447)

EDER (J.-M.) und E. VALENTA. — Versuche über Photographie mittelst der Röntgen'schen Strahlen. Herausgegeben mit Genehmigung des k. k. Ministeriums für Cultus und Unterricht von der k. k. Lehr- und Versuchs-Anstalt für Photographie- und Reproductions-Verfahren in Wien. Halle, W. Knapp. In-fol., 15 pl. av. 16 p. de texte. 25 fr. (2448)

—— —— Spectralanalytische Untersuchung des Argons (Extr. des *Denkschr. d. k. Akad. der Wissenschaften.*) Vienne, C. Gerold's Sohn. In-4°, 39 p. av. 2 fig. et 3 pl. 4f,25. (3553)

GALITZIN (B.) and A. v. KARNOJITZKY. — Ueber die Ausgangspunkte und Polarisation der X-Strahlen (Extr. des *Mém. de l'Acad. imp. de Saint-Pétersbourg*). Saint-Pétersbourg. In-4°, 13 p. av. 14 pl. phototyp. 3f,75. (3199)

GUARESCHI (I.). — Einführung in das Studium der Alkaloide, mit besonderer Berücksichtigung der vegetabilischen Alkaloide und der Ptomaine. In deutscher Bearbeitung herausgegeben von *H. Kurz-Krause*. 1. Hälfte. Berlin, R. Gaertner. In-8°, VII-304 p. 22f,50. (4364)

Handbuch der Physik, unter Mitwirkung von F. Auerbach, F. Braun, E. Brodhun u. A. herausgegeben von *A. Winkelmann*. II. Bd. 2. Abth. Breslau, E. Trewendt. In-8°, VI-887 et LV p. av. 128 fig. 35 fr. (2019)

JANNASCH (P.). — Praktischer Leitfaden der Gewichtsanalyse. Leipzig, Veit und Co. In-8°, XII-314 p. av. fig. 8f,15. (4371)

MACH (E.). — Die Principien der Wärmelehre. Historisch-kritisch entwickelt. Leipzig, J.-A. Barth. In-8°, VIII-472 p. av. 105 fig. et 6 portraits. 12f,50. (3967)

MEYER (P.). — Die Doppelkraft des Lichtes und ihre Metamorphose. Ein monistich-antimaterialistiches Natursystem. Leipzig, Mutze. In-8°, IV-273 p. 6f,25. (3569)

PANESCH (K.-G.). — Röntgen-Strahlen, Skotographie und Od. Nach den neuesten Forschungen leichtfasslich dargestellt. Neuwied, L. Heuser. In-8°, VII-65 p. av. 19 fig. 1f,90. (3972)

REIFF (R.). — Theorie molekular-electrischer Yorgange. Fribourg en Br., J.-C.-B. Mohr. In-8°, IX-493 p. 7f,50. (3975)

RIECKE (E.). — Lehrbuch der Experimental-Physik zu eigenem Studium und zum Gebrauch bei Vorlesungen. II. Bd. Magnetismus, Elektrizität, Wärme. Leipzig, Veit und Co. In-8°, XII-492 p. av. 247 fig. 12f,50. (2829)

VOIGT (W.). — Kompendium der theoretischen Physik. II. Bd. Elektricität und Magnetismus. Optik. Leipzig, Veit und Co. In-8°, XIV-810 p. 22f,50. (L'ouvrage complet 40 fr.). (2047)

VOLLER (A.). — Mittheilungen über einige im physikalischen Staats-Laboratorium ausgeführte Versuche mit Röntgenstrahlen. (Extr. des *Jahrbücher der hamburg. wissensch. Anstalten.*) Hambourg, L. Gräfe und Sillem. In-8°, 17 p. av. 7 pl. phototyp. 3f,75. (3583)

WESELY (J.). — Grundzüge der allgemeinen und technischen Physik. Grundlehren der Meteorologie. Repetitorium für den I. und II. Jahrescurs der mechanisch-technischen, bau- und chemisch-technischen Abtheilung an höheren Staats-Gewerbeschulen. Pilsen, W. Steinhauser. In-8°, VII-587 p. av. 518 fig. 9 fr. (2048)

### 3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Abhandlungen der königl. preussischen geologischen Landesanstalt. Neue Folge. 21. Heft. Die floristische Gliederung des deutschen Carbon und Perm. Von *H. Potonié.* Berlin, S. Schropp. In-8°, II-58 p. av. 48 fig. 3f,15. (3182)

Abhandlungen, palaeontologische. Herausgegeben von W. Dames und E. Kayser. Neue Folge. II. Bd. 6 Heft. Uber einige Versteinerungen aus der Kreideformation der karnischen Voralpen. Von K. *Futterer.* Iéna, G. Fischer. In-4°, X-30 p. av. fig. et 7 pl. (Fin). 15 fr. (2801)

BAUER (M.). — Edelsteinkunde. Eine allgemein verständliche Darstellung der Eigenschaften, des Vorkommens und der Verwendung der Edelsteine. 8. u. 9. Lief. Leipzig, C.-H. Tauchnitz. In-8°, p. 385-528, av. pl. chromolith., phototyp. et nombreuses fig. dans le texte. Chaque livraison, 3f,15. (2439)

—— —— 10. Lfg. Leipzig, C.-H. Tauchnitz. In-8°. (Fin.) (3948)

BLANCKENHORN (M.). — Entstehung und Geschichte des Todten Meeres. Ein Beitrag zur Geologie Palästinas (Extr. des *Zeitschriften des deutschen Palästina-Vereins*). Leipzig, K. Baedeker. In-8°, 59 p. av. 8 fig. et 4 pl. 3 fr. (2442)



BRAUNS (R.). — Chemische Mineralogie. Leipzig, C.-H. Tauchnitz. In-8°, XIV-460 p. av. 32 fig. 10 fr. (4348)

BREZINA (A.). — Die Meteoritensammlung des k. k. naturhistorischen Hofmuseums am 1. Mai 1895. Mit 2 Anhängen : 1. Berichte des Directors der Sternwarte Zacatecas, José A. y Bonilla, über den Meteoreisenfall von Mazapil. 2. Die Meteoritensammlung der Universität Tübingen. (Extr. des *Annalen d. k. k. naturhist. Hofmuseums*). Vienne, A. Hölder. In-8°, 140 p. av. 40 fig. et 2 pl. 10 fr. (3191)

FRAAS (E.). — Die schwäbischen Trias-Saurier, nach dem Material der königl. Naturalien-Sammlung in Stuttgart zusammengestellt. Stuttgart, E. Schweizerbart. In-4°, 18 p. av. 6 pl. et 10 fig. 15 fr. (4359)

HALAVATS (G.). — A magyar országi artézi kutak története (Histoire des sources artésiennes en Hongrie). Budapest, F. Kilian. In-8°, 103 p. 4f,40. (4580)

KEILHACK (K.). — Lehrbuch der praktischen Geologie. Arbeits- und Untersuchungsmethoden auf dem Gebiete der Geologie, Mineralogie und Palaeontologie. Stuttgart, F. Enke. In-8°, XVI-638 p. av. 232 fig. et 2 pl. doubles. 20 fr. (4372)

KOKEN (E.). — Die Leitfossilien. Ein Handbuch für den Unterricht und für das Bestimmen von Versteinerungen. Leipzig, C.-H. Tauchnitz. In-8°, III-848 p. av. environ 900 fig. dans le texte. 17f,50. (4373)

LAUBE (G.-C.). — Schildkrötenreste aus der böhmischen Braunkohlenformation. Prague, J.-G. Calve. In-4°, 19 p. av. 4 pl. 5 fr. (2023)

LIEBISCH (T.). — Grundriss der physikalischen Krystallographie. Leipzig, Veit und Co. In-8°, VIII-506 p. av. 898 fig. 16f,75. (2027)

LUEDECKE (O.). — Die Minerale des Harzes. Eine auf fremden und eigenen Beobachtungen beruhende Zusammenstellung der von unserem heimischen Gebirge bekannt gewordenen Minerale und Gesteinarten. Berlin, Gebr. Borntræger. In-8°, XII-643 p. av. 1 Atlas de 27 pl. et 1 carte. 70 fr. (3966)

MARTINI und CHEMNITZ. — Systematisches Conchilien-Cabinet. 421. u. 422. Lfg. Nüremberg, Bauer und Raspe. In-4°. Chaque livraison 11f,25. (3566)

—— —— Systematisches Conchilien-Cabinet. Sect. 139. Nüremberg, Bauer und Raspe. In-4°. 33f,75. (3567)

Milch (L.). — Beiträge zur Kenntnis des Verrucano. II. Tl. Leipzig, Veit und Co. In-8°, IV-174 p. 5 fr. (2032)

Mojsisovics v. Mojsvar (E.). — Beiträge zur Kenntniss der obertriadischen Cephalopoden-Faunen des Himalaya. (Extr. des *Denkschr. d. k. Akad. der Wissenschaften*). Vienne, C. Gerold's Sohn. In-4°, 129 p. avec 8 fig. et 22 planches. 22f,50. (3211)

Sederholm (J.-J.). — Ueber einen metamorphosirten præcambrischen Quarzporphyr von Karvia in der Provinz Abo. (Extr. du *Bull. de la Commission géologique de la Finlande*). Helsingfors. In-8°, 16 p. avec 12 fig. 0f,80. (2041)

Stromer v. Reichenbach (E.). — Die Geologie der deutschen Schutzgebiete in Afrika. Münich, R. Oldenbourg. In-8°, VIII-203 p. avec 3 cartes en coul. et plusieurs profils. 9f,40. (3080)

Toula (F.). — Geologische Untersuchungen im östlichen Balkan und abschliessender Bericht über diese geologischen Arbeiten im Balkan (Extr. des *Denkschr. d. k. Akad. der Wissenschaften*). Vienne, C. Gerold's Sohn. In-4°, 40 p. avec 1 carte géol. 7 fr. (3216)

Wrany (A.). — Die Pflege der Mineralogie in Böhmen. Ein Beitrag zur vaterländischen Geschichte der Wissenschaften. 2. Hälfte. II. Thl. Prague, H. Dominicus. In-8°, p. VII-VIII et p. 321-421 (Fin). 3f,50. (3218)

### 4° *Mécanique appliquée et Machines.*

v. Hoyer (E.). — Kurzes Handbuch der Maschinenkunde. 9. Lfg. Münich, Th. Ackermann. In-8°, p. 769-864, avec fig. 3 fr. (3786)

Lewicki (J.-L.). — Bericht über rauchfreie Dampfkessel-Anlagen in Sachsen. Calorimetrische Untersuchungen. Leipzig, A. Felix. In-4°, 206 p. avec 26 fig. et 21 planches. 11f,25. (2666)

### 5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

Baltz Edler v. Balzberg (C.). — Die Siedesalz-Erzeugung von ihren Anfängen bis auf ihren gegenwärtigen Stand, nebst einem Anhang über Seesalinen (Extr. de la *Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen*). Berlin, W. Ernst und Sohn. In-4°, VII-159 p. av. 4 fig. dans le texte et 1 atlas de 10 pl. in-fol. 40 fr. (3779)

Handbuch der chemischen Technologie Herausgegeben von



*O. Dammer*. III. Bd. Stuttgart, F. Enke. In-8°, X-771 p. avec 288 fig. 26f,25. (3422)

Holz (A.). — Die Schule des Elektrotechnikers. Lehrhefte für die angewandte Elektricitätslehre. Herausgegeben im Verein mit *H. Wieweger* und *H. Stapelfeld*. 14.—17. Heft. Leipzig, M. Schäfer. In-8°. Chaque fascicule 0f,80. (3785)

Pawlewski (B.). — Podrecznik analizy chemiczno-technicznej. Czesé I. Lemberg. In-8°, 176 p. (Manuel d'analyse chimico-technique). 10 fr. (2462)

Schnabel (C.). — Handbuch der Metallhüttenkunde. II. Bd. Zink, Cadmium, Quecksilber, Wismuth, Zinn, Antimon, Arsen, Nickel, Kobalt, Platin, Aluminium. Berlin, J. Springer. In-8°, XII-706 p. av. 362 fig. (Fin). 22f,50. (2675)

### 6° *Exploitation des mines.*

Behrens. — Beiträge zur Schlagwetterfrage. Essen, G.-D. Baedeker. In-8°, 115 p. avec fig. et 19 planches. 7f,50. (3949)

Bilharz (O.). — Die mechanische Aufbereitung von Erzen und mineralischer Kohle in ihrer Anwendung auf typische Vorkommen. I. Bd. Die Aufbereitung der Erze. Leipzig, A. Felix. In-8°, IV-163 p. av. atlas in-fol. de 45 pl. 42f,50. (4575)

Tecklenburg (T.). — Handbuch der Tiefbohrkunde. V. u. VI. Bd. Leipzig, Baumgärtner. In-8°, XV-213 p. avec 95 fig. et 35 pl.; XIV-237 p. avec portrait, 51 fig., 22 pl. lith. et 4 pl. phototyp. Chaque volume 20 fr. (3070)

### 7° *Chemins de fer.*

Eisenbahn-Technik, die, der Gegenwart. Herausgegeben von *Blum, v. Bories, Barkhausen*. I. Bd. Das Eisenbahn-Maschinenwesen der Gegenwart. I. Abschn. Die Eisenbahn-Betriebsmittel. I. Thl. Die Lokomotiven. Wiesbaden, C.-W. Kreidel. In-8°, XII-368 p. avec 482 fig. et 8 pl. lith. 18f,25. (3419)

Schuster v. Bonnott (R.) und A. Weeber. — Die Rechtsurkunden der österreichischen Eisenbahnen. Sammlung der die österreichischen Eisenbahnen betreffenden Specialgesetze, Concessions- und sonstigen Rechtsurkunden. 21. u. 22. Heft. Vienne, A. Hartleben. In-8°, III. Bd., p. 321-576. Chaque fascicule 2f,80. (2423-3527)

8° *Objets divers.*

Habenicht (H.). — Grundris seiner exacten Schöpfungsgeschichte. Vienne, A. Hartleben. In-8°, VIII-136 p. avec 7 cartes et 2 illust. dans le texte. 5 fr. (3204)

Wollny (E.). — Die Zersetzung der organischen Stoffe, und die Humusbildungen. Mit Rücksicht auf die Bodenkultur. Heidelberg, C. Winter. In-8°, X-479 p., av. 52 fig. 20 fr. (4386)

---

## OUVRAGES ITALIENS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

Arzelà (C). — Sull' esistenza degli integrali nelle equazioni differenziali ordinarie : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 12 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell' istituto di Bologna*). (6404)

Cannizzo (F.). — Varietà di rotazione nello spazio a cinque dimensioni. Rome, tip. Sallustiana. In-4°, 32 p. (9394)

Ces`ro (E.). — Lezioni di geometria intrinseca. Naples, tip. d. r. accad. d. scienze. In-8° av. fig., 263 p. 8 fr.

Drago (G.). — Dottrina dei caratteri della divisibilità. Turin, Clausen. In-8°, 31 p. 2 fr. (5983)

Loria (G.). — Il passato ed il presente delle principali teorie geometriche. Seconda edizione accresciuta ed interamente rifatta. Turin, Clausen. In-8°, XX-346 p. 8 fr. (5472)

—— Matematica. Mantoue, tip. G. Mondovi. In-16, 31 p. (Extr. du *Dizionario illustrato di pedagogia*). (9820)

Mariantoni (F.). — Nota sulle relazioni che intercedono trai multirapporti di due N — uple di elementi di una forma geometrica di prima specie. Rieti, tip. P. Petrongari. In-8°, 8 p. (7806)

Massimi (P.). — Sui sistemi di linee di una superficie lossodromici rispetto ad un sistema di geodetiche. Rome, tip. G. Balbi. In-4°, 8 p. (9403)

Modè (G.). — Di una proprietà del dodecaedro e dell' icosaedro regolari convessi. Vicence, tip. G. Raschi. In-8°, 10 p. (5018)



Monetti (F.). — Il triangolo sferico e le sue forme trigonometriche da un punto di vista più ampio. Naples, tip. R. Pesole. In-8°, 16 p. (5473)

Pascal (E.). — I determinanti : teoria ed applcazioni con tutte le più recenti ricerche. Milan, U. Hoepli. In-16°, VIII-330 p. (6418)

Pincherle (S.). — Sulle equazioni differenziali lineari non omogenee e le operazioni funzionali che esse definiscono : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 15 p. (Extr. du *Rendiconto delle sessioni d. r. accad. d. scienze dell' istituto di Bologna.*) (6420)

Repetto (G.). — Corrispondenze polari di caratteristiche, *a*, *b*, *c*. Sassari, tip. Dessi. In-8°, 25 p. (8581)

Scarpis (U.). — Primi elementi della teoria dei numeri. Milan, U. Hoepli. In-16, VIII-152 p. (6423)

Sciolette (G.-B.). — Equilibrio interno dei sistemi elastici lineari nel piano e nello spazio : esposizione dei metodi delle derivate e degli spostamenti. Rome, tip. F. Cuggiani. In-8°, 89 p. (6884)

Spelta (C.). — Sull'integrazione dei sistemi di equazioni differenziali simultanee di qualunque ordine e grado : nota I, 8 p. ; nota II, 6 p. Gênes, tip. Ciminago. In-4°. (6886)

Vecchi (S.). — Lezioni di geometria proiettiva, dettate nell'anno accademico 1895-96. Disp. 1-12. Parme, lit. Bartoli. In-8°, p. 1-94, avec fig. (9412)

Volpi (R.) e Zoccoli (E.-G.). — Di un'applicazione della teoria dei gruppi del Cantor al problema gnoseologico : nota. Modène, tip. A. Moneti. In-8°, 15 p. avec fig. (10267)

2° *Physique et Chimie.*

Andreocci (A.) e Celso (U.). — Relazione dell'analisi chimica dell' acqua acidula di Vasciano presso Todi eseguita nel r. istituto chimico di Roma. Rome, tip. delle Mantellate. In-16, 7 p. (Extr. de la *Rivista d'igiene e sanità pubblica*). (6403)

Antony (U.) e Lucchesi (A.). — Sul comportamento del solfuro aurico coi solfuri alcalini : nota (Laboratorio di chimica generale della r. università di Pisa). Livourne, lit. Meucci. In-8°, 6 p. (9019)

Battelli (A.). — Sul luogo di emanazione dei raggi Röntgen nei tubi a vuoto : ricerche. Pise, tip. Pieraccini. In-8°, 15 p. avec fig. (Extr. du *Nuovo Cimento*). (5006)

Battelli (A.) e Garbasso (A.). — Sopra un modo di ridurre il tempo di posa delle fotografie eseguite coi raggi di Röntgen : nota. Pise, tip. Pieraccini. In-8°, 4 p. (Extr. du même recueil). (5007)

—— Sulla dispersione delle cariche elettrostatiche prodotta dai raggi ultravioletti : nota. Pise, tip. Pieraccini. In-8°, 6 p. (Extr. du même recueil). (6405)

Bertoni (G.). — Composizione di acque minerali. Livourne, tip. A. Debatte. In-8°, 4 p. (Extr. de l'*Annuario del laboratorio di chimica generale e tecnologia d. r. accad. navale di Livorno*). (9022)

—— Sulla natura chimica dell'acqua minerale di S. Pellegrino (fonte Salaroli) : relazione analitica. Livourne, tip. A. Debatte. In-8°, 16 p. (9023)

Borsari (A.). — Nota sui diagrammi elettrolitici. Bologne, Zanichelli. In-8°, 16 p. (7354)

Bottazzi (A.). — Sui fenomeni luminosi prodotti da correnti alternate di alta frequenza. Naples, tip. M. Priore. In-8°, 38 p. avec planche. (9391)

Camilla (S.). — Sulla intaccabilità dell'alluminio dal punto di vista igienico : ricerche chimiche (Ministero dell'interno : laboratori scientifici della divisione di sanità; sezione chimica). Rome, tip. delle Mantellate. In-8°, 38 p. (Extr. de la *Rivista d'igiene e sanità pubblica*). (10260)

Cavazzi (A.). — Sui fosfiti di cromo : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 10 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell'istituto di Bologna*). (6407)

Ciamician (G.) e Silber (P.). — Ricerche sugli alcaloidi del melagrano ; sulla costituzione della Granatanina e dei suoi derivati : III memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 19 p. avec fig. (Extr. du même recueil). (4644)

—— Sulla n-metiltroponina : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 9 p. (Extrait du même recueil). (5011)

Cintis (M. de). — I raggi Röntgen. Naples, tip. ed. E. Pietrocola. In-16, 47 p. (9816)

Donati (L.). — Sul rapporto fra l'attività elettro-dispersiva e l'attività fotografica dei raggi del Röntgen : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 7 p. (Extrait du *Rendiconto delle sessioni d. r. accad. scienze dell'istituto di Bologna*). (6877)

Galilei Galileo. — Le opere. Edizione nazionale sotto gli auspici di Sua Maestà il Re d'Italia. Volume VI. Florence, tip. G. Barbèra. In-4°, 662 p. avec fig. (6412)



Giacomelli (L.). — Su la determinazione sollecita dell'anidride fosforica nei fosfati e perfosfati. Florence, tip. Minorenni corrigendi. In-8°, 7 p. (Extr. de l'*Orosi*). (5012)

Keller (F.). — Sull'intensità orizzontale del magnetismo terrestre nei pressi di Roma, con note che riguardano le condizioni geofisiche delle località esplorate. Rome, tip. Ad. ved. Pateras. In-8°, 11 p. (5935)

Lami (P.). — Sul potenziale elettrico ed altre quantità d'uso in elettrostatica. Pistoïa, tip. Flori e Biagini. In-8°, 13 p. (5013)

Longi (A.) e Camilla (S.). — Intorno alla determinazione del manganese nelle soluzioni manganose e permanganiche. Rome, tip. V. Biccheri. In-8°, 23 p. (10264)

Murani (O.). — Sperimenti sui raggi Röntgen. Milan, U. Hoepli. In-4°, 19 p., avec 6 planches. 2 fr. (Extr. des *Memorie d. r. istituto lombardo di scienze e lettere*). (5475)

Negri (G. de) e Sburlati (G.). — Sull' olio di legno (Wood-oil). Gênes, tip. Ciminago. In-8°, 8 p. (Extr. des *Atti d. soc. ligustica di scienze naturali*). (9822)

Pettinelli (P.). — Sulla trasparenza per i raggi oscuri delle sostanze diafane costituenti l'occhio. Florence, tip. S. Landi. In-8°, 4 p. (Extr. de la *Rivista scientifico-industriale*). (5477)

Pettinelli (P.) e Marolli (B.). — Sulla temperatura del massimo di densità delle soluzioni alcooliche. Florence, tip. S. Landi. In-8°, 3 p. (Extr. du même recueil). (5478)

Righi (A.). — Sulla propagazione dell' ellettricità nei gas attraversati dai raggi di Röntgen : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 73 p. av. fig. (Extr. des *Mem. d. r. accad. d. scienze dell' istit. di Bologna*). (9826)

Sestini (Q.). — Sulla determinazione della formola dei composti chimici in base ai resultati analitici : osservazioni. Florence, tip. Minori corrigendi. In-8°, 8 p. (Extr. de l'*Orosi*). (7362)

Torre (G. Del). — Trattato di chimica generale. Vol. II. Rome, tip. Failli. In-8°, p. 345-755, avec fig. 3 fr. (7810)

Ventura (N.). — Sui raggi X di Röntgen : nota preliminare. Milan, tip. G. Rozza. In-16, 15 p. (Extr. de la revue *L'Elettricità*). (4649)

Villari (E.) — Sui raggi catodici e sui raggi Röntgen : ricerche. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 16 p. avec fig. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell'istituto di Bologna*). (6424)

Vitali (D.). — Metodo volumetrico per stabilire la purezza dell'allume e del solfato di zinco. Milan, tip. del Riformatorio patronato. In-8°, 4 p. (Extr. du *Bollettino chimico-farmaceutico*). (6890)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

Amighetti (A.). — Una gemma subalpina : escursioni autunnali e conversazioni sulla geologia applicata al lago d'Iseo. Lovere, tip. L. Filippi. In-8°, xxx-816 p., avec 4 planches. 6 fr. (6873)

Baratta (M.). — Il terremoto fiorentino del 18 maggio 1895 : nota preliminare. Rome, tip. dell' Unione cooperativa editrice. In-8°, 4 p. avec fig. (Extr. des *Notizie sui terremoti avvenuti in Italia durante l'anno* 1895). (5460)

—— Il microsismografo Vicentini ed i recenti terremoti avvenuti all'estero. Rome, soc. edit. Dante Alighieri. In-16, 14 p. av. fig. (10258)

Bellardi (L.). — I molluschi dei terreni terziarî del Piemonte e della Liguria. Parte XX (Caecidae, Vermetidae, Siliquariidae, Phoridae, Calyptraeidae, Capulidae, Hipponycidae, Neritidae e Neritopsidae), a cura del dott. *F. Sacco*. Turin, C. Clausen. In-4°, 65 p. avec 5 planches. (7802)

Bombicci (L.). — Sulla intrusione forzata ascendente di argille fattesi simili alle A. scagliose, con breccioline verdi associate nelle fratture verticali dei banchi selenitici presso Bologna : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 5 p. avec 1 planche (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell'istituto di Bologna*). (5462)

Canavari (M.). — Rapporto sulle condizioni geologiche del territorio del comune di Calci in relazione all'applicazione che si vorrebbe fare in esso della legge forestale 20 giugno 1877. Pise, tip. F. Mariotti. In-8°, 29 p. (6406)

Capellini (G.). — Caverne e brecce ossifere dei dintorni del golfo di Spezia : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 19 p. avec 2 planches. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell'istituto di Bologna*). (9025)

Corti (B.). — Ricerche micropaleontologiche sul Villafranchiano della collina di Castenedolo. Brescia, tip. F. Apollonio. In-8°, 13 p. (Extr. des *Commentari dell'ateneo di Brescia*). (10262)

Fucini (A.). — Fossili del Lias medio del Monte Calvi presso Campiglia Marittima. Pise, tip. Nistri e C. In-8°, 7 p. (Extr. des *Proc. verb. d. soc. toscana di scienze naturali*). (6411)

Gregorio (A. de). — Appunti su talune conchiglie estramarine di Sicilia viventi e fossili, con la spiegazione delle tavole dell'opera di Benoît. Palerme, tip. Virzi. In-8°, 30 p. (Extr. du journal *Il Naturalista siciliano*). (5468)



Guzzanti (G.). — Il microsismoscopio Guzzanti. Rome, tip. dell'Unione cooperativa editrice. In-8°, 3 p. avec fig. (Extr. du *Bollett. d. soc. sismologica italiana*). (5469)

Longhi (P.). — Della pietra da coti o da mola bellunese e di alcuni suoi fossili (*Schizzodelphis squalodontoides* Capellini n. sp. ecc.) : memoria. Padoue, tip. Prosperini. In-8°, 48 p. avec 2 planches. (Extr. des *Atti d. soc. veneto-trentina di scienze naturali*). (7805)

Meli (R.). — Molluschi fossili recentemente estratti dal giacimento classico del monte Mario presso Roma : nota. Rome, tip. d. r. accad. dei Lincei. In-8°, 13 p. (Extr. du *Bollett. d. soc. geol. italiana*). (5016)

—— Sulla esistenza di strati di torba affioranti in mare lungo la spiaggia di Foligno presso Nettuno (provincia di Roma) : nota. Rome, tip. d. r. accad. dei Lincei. In-8°, 24 p. (Extr. du même recueil). (5017)

Peola (P.). — Flora fossile dell' astigiano : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 20 p. avec planche (Extr. de la *Rivista italiana di paleontologia*). (6419)

Piaz (G. Dal). — Studî geologici-petrografici intorno ai colli Euganei. I. Padoue, tip. Cooperativa. In-8°, 30 p. (Extr. de la *Rivista di mineralogia e cristallografia*). (8215)

Portis (A.). — Contribuzioni alla storia fisica del bacino di Roma e studî sopra l'estensione da darsi al Pliocene superiore. Vol. II, parte IV-V. Turin, Roux, Frassati e C. In-4°, 513 p. avec 5 planches. 20 fr. (6881)

Prato (A. Del). — Delfinoide fossile del Parmense : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 6 p. (Extr. de la *Rivista italiana di paleontologia*). (6882)

Razzore (A.). — Alcuni scafopodi del pliocene ligure. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 19 p. avec planche (Extr. des *Atti. d. soc. ligustica di scienze naturali e geografiche*). (9410)

Regàlia (E.). — Sulla fauna della Grotta dei Colombi (Is. Palmaria, Spezia) : nota paleontologica. Florence), tip. S. Landi. In-8°, 40 p. av. 3 pl. (Extr. de l'*Archivio per l'antropologia e l'etnologia*). (9824)

Riva (C.). — Le rocce paleovulcaniche del gruppo dell' Adamello. Milan, U. Hoepli. In-4°, p. 159-228, avec 4 planches. 3',15. (Extr. des *Memorie d. istituto lombardo di scienze e lettere*). (5480)

Sangiorgi (D.). — Il tortoniano dell' alta valle dell'Idice : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 26 p. avec fig. et 1 planche. (Extr. de la *Rivista italiana di paleontologia*). (7360)

Simonelli (V.). — Corso di mineralogia, anno accademico 1895-96. Disp. 1-2 (R. università di Parma). Parme, tip. Bartoli. In-8°, p. 1-14, avec fig. (5482)

—— Fossili tortoniani di Castelnovo ne' Monti : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 2 p. (Extr. de la *Rivista italiana di paleontologia*). (8217)

Tacchini (P.). — Terremoto di Roma del 1° novembre 1895. Rome, tip. dell' Unione cooperativa editrice. In-8°, 8 p. (7364)

Trabucco (G.). — Sulla posizione ed età delle argille galestrine e scagliose del Flysch e delle serpentine terziarie dell'Appennino settentrionale : memoria preliminare. Florence, tip. M. Ricci. In-4°, 30 p. (7365)

Vicentini (G.). — Fenomeni sismici osservati a Padova dal febbraio al settembre 1895 col microsismografo a due componenti : studio. Padoue, tip. Prosperini. In-8°, 63 p. (Extr. des *Atti d. soc. veneto-trentina di scienze naturali*). (8219)

Vinassa de Regny (P.-E.). — A proposito dei tufi glauconitici di Zovencedo : nota. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-8°, 2 p. (Extr. de la *Rivista italiana di paleontologia*). (9827)

### 4° *Mécanique appliquée et Machines.*

Garibaldi (C.). — Saggio di una teoria economica delle macchine. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 34 p. (Extr. du *Giornale d. soc. di letture e conversazioni scientifiche*). (7280)

Garuffa (E.). — Meccanica industriale : macchine motrici ed operatrici a fluido. Volume I. Seconda edizione completamente riformata e portata al corrente dei progressi teorici e pratici. Milan, U Hoepli. In-8°, 703 p. avec fig. 16 fr. (6481)

Masi (F.). — La teoria dei meccanismi. Bologne, Zanichelli. In-8°, 384 p. av. 24 pl. 10 fr. (8285)

### 5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

Ascoli (M.). — Introduzione allo studio delle applicazioni elettriche. Rome, L'Elettricista. In-8°, VIII-312 p. 6 fr. (9021)

Bacigalupo (L.). — L'acetilene e le sue applicazioni. Gênes, tip. istit. Sordomuti. In-8°, 47 p., av. fig. (9502

Cavazzi (A.) e Baroni (G.). — Potere calorifico di alcuni combustibili solidi, determinato col calorimetro del Mahler e con quello del Thompson : memoria. Bologne, tip. Gamberini e Parmeggiani. In-4°, 16 p. (Extr. des *Memorie d. r. accad. d. scienze dell'istituto di Bologna*). (9026)



Four (Nouveau) électrique à double recouvrement de l'énergie thermique pour la production industrielle des carbures et spécialement du carbure de calcium. Rome, tip. Artero. In-8°, 15 p. av. 2 pl. (7923)

Garelli (F.). — Sul metodo del Wehrenfennig per analizzare e corregere le acque usate nelle caldaie a vapore (Associazione dei possessori delle caldaie a vapore nelle provincie dell'Emilia e delle Marche, residente in Bologna). Bologne, tip. Azzoguidi. In-8°, 44 p. (8314)

Marazza (E.). — L'industria saponiera, con alcuni cenni sulle industrie della soda e della potassa ; materie prime e fabbricazione in generale : guida pratica. Milan, U. Hoepli. In-16°, VII-410 p. av. fig. (6036)

Piazzoli (E.). — Impianti di illuminazione elettrica : manuale pratico. Terza edizione rifatta, seguita da un' appendice contenente la legislazione italiana relativa agli impianti elettrici. Milan, U. Hoepli. In-16, XXXI-538 p. av. fig. (9906)

Pollacci E.). — Fosfato neutro e fosfato acido di calcio studiati principalmente dal punto di vista agronomico, lettura fatta al r. istituto lombardo. Pavie, tip. fr. Fusi. In-8°, 15 p. (Extr. du journal *Selmi*). (6041)

Raddi (A.). — La fabbricazione del carburo di calcio e la spesa d'impianto relativa per una fabbrica in Toscana. Florence, tip. G. Campolmi. In-8°, 23 p. (Extr. du *Commercio toscano.*) (4717)

Sestini (F.). — Chimica agraria : nutrizione delle piante. Pise, tip. ed. F. Mariotti. In-8°, 247 p. av. fig. (9909)

Zago Ferruccio. — Le scorie fosfatiche Thomas e il loro impiego come concime. Rovigo, tip. Vianello. In-16, 11 p. (7513)

### 6° *Exploitation des mines. — Gîtes minéraux.*

Martini (C.). — Una gita alle cave di ardesia in Cogorno. Gênes, tip. A. Ciminago. In-8°, 10 p. (Extr. des *Atti d. soc. ligustica di scienze naturali e geografiche.*) (9402)

Rivista del servizio minerario nel 1895 (Ministero di agricoltura, industria e commercio : direzione generale dell'agricoltura). Rome, tip. G. Bertero. In-8°, LXXXVIII-323 p. 2f,50. (8696)

Travaglia (R.). — Per l'industria solfifera. Palerme, tip. del Giornale di Sicilia. In-8°, 19 p. (Extr. du *Giornale di Sicilia*). (5607)

### 7° *Construction. — Chemins de fer.*

Biadego (G.-B.). — Di alcuni casi singolari e di alcune questioni relative all'impiego dell'acciaio dolce nelle costruzioni : esperienze e studî. Milan, tip. degli Operai. In-4°, 12 p. (Extr. du journal *L'Industria*). (4702)

Chiaffarino (V.). — Studio sulle locomotive per linee a forti pendenze. Gênes, tip. fr. Armanino. In-4°, 13 p. av. 3 pl. (8646)

Costruttore (Il) : trattato pratico delle costruzioni civili, industriali e pubbliche, delle arti ed industrie attinenti, disposto alfabeticamente, ad uso dell'ingegnere civile ed industriale, dell'architetto, dell'agronomo, dei capimastri, imprenditori, industriali, ecc. Opera illustrata da oltre 4000 incisioni. Milan, F. Vallardi. In-4°, av. fig. Disp. 149-152, p. 545-656, av. 1 planche. (5989-6479)

Costruzione ed esercizio delle strade ferrate e delle tramvie : norme pratiche dettate da una eletta di ingegneri specialisti. Turin, Unione tipografico-editrice. In-4° av. fig., Disp. 117, p. 185-216, av. 4 pl.; Disp. 118-121, p. 1-52 av. 26 pl. ; Disp. 122-123, 94 p., av. 4 pl. 2 fr. la livraison. (5552-6962-10305)

Costruzioni metalliche in ferro ed acciaio : raccolta delle disposizioni legislative, norme e prescrizioni vigenti nei diversi paesi relativamente alla loro esecuzione e conservazione, per cura di *G.-B. Biadego*. Turin, tip. Camilla e Bertolero. In-8°, VIII-275-DXXVIII p. av. fig. (4679)

Guidi (C.). — Lezioni sulla scienza delle costruzioni. Parte I-III (Nozioni di statica grafica; Teoria dell'elasticità e resistenza dei materiali ; Elementi delle costruzioni, statistica delle costruzioni civili). Seconda edizione. Turin, tip. Camilla e Bertolero. In-8° av. fig. 3 vol. 120-281-98 p. (5074)

Leoni (B.). — Lavori in terra. Milan, U. Hoepli. In-16, XI-305 p. av. fig. (4682)

Panzarasa (A.). — Tramvie elettriche a conduttura aèrea o tramvie elettriche con accumulatori? Rome, tip. G. Civelli. In-4°, 13 p. (Extr. du *Giornale dei lavori pubblici e delle strade ferrate*). (5075)

Raddi (A.). — Resultati sperimentali sulla resistenza di alcuni materiali da costruzione allo schiacciamento. Florence, tip. G. Carnesecchi e figli. In-8°, 15 p. 3 fr. (Ext. des *Atti del collegio degli architetti ed ingegneri in Firenze*). (4683)



Sodano (L.). — Consolidamento dei terreni franosi attraversati da strade ordinarie e ferrate. Turin, tip. Camilla e Bertolero. In-8°, 122 p. av. fig. et 6 pl. (5078)

Tessitore (S.). — Ferrovia economica Napoli-Piedimonte d'Alife : memoria contenente gli studî per la trazione elettrica. Naples, tip. gazzetta *Diritto e Giurisprudenza*. In-4°, 80 p. (9480)

### 8° *Législation. — Économie sociale.*

Dettagli sulle condizioni dei conduttori di locomotive : appendice n° 7 al memoriale, Sulle condizioni dei ferrovieri (Lega ferrovieri italiani). Empoli, tip. Traversari. In-4°, 13 p. (9769)

Giornata (La) di lavoro dei macchinisti e fuochisti delle grandi reti ferroviarie italiane (Societa di M. S. e miglioramento fra i conduttori di locomotive). Empoli, tip. Traversari. In-4°, 8 p. (9773)

### 9° *Objets divers.*

Boccardo (E.-C.) e Baggi (V.). — Trattato elementare completo di geometria pratica. Disp. 43-44. Parte II (Topografia). Turin, Unione tipografico-editrice. In-8°, p. 161-224, av. 8 planches. 1f,60 la livraison. (4642-8574)

Bonino (A.). — La fonderia nella sua modellatura, formatura e lavorazione : opera scritta espressamente per gl'ingegneri, capitecnici e per gli operai degli stabilimenti meccanici, utilissima ai docenti ed allievi delle scuole industriali. Gênes, tip. fr. Pagano. In-8°, 60 p., av. 58 pl. 6 fr. (8673)

Crugnola (G.). — Dizionario tecnico di ingegneria e di architettura nelle lingue italiana, francese, inglese e tedesca, compresovi le scienze, arti e mestieri affini. Parte I, disp. 66-68, p. 177-320. Turin, A.-F. Negro. In-8°. (5990-7433-8408)

Gibelli (G.). — La terra. Parte III (Nuova ipotesi sulla causa che produce il moto degli astri). Milan, tip. d. soc. edit. Sonzogno. In-16, 20 p. 0f,75. (6413)

Landi (D.). — Disegno di proiezioni ortogonali. Milan, U. Hoepli. In-16, 152 p. av. fig. (4646)

Maria (V. de). — Studio su i torrenti : mezzi da impiegarsi per regolarli ed estinguerli. Disp. 5-13 (Fin). Naples, tip. Pontieri. In-8°, p. 65-207. (9879)

Notizie sulle condizioni industriali della provincia di Trapani (Ministero di agricoltura, industria e commercio : direzione generale della statistica). Rome, tip. Nazionale di G. Bertero. In-8°, 73 p. (Extr. des *Annali di statistica*). (9905)

Severa (V.). — Genesi della materia : teoria. Arezzo, tip. coop. Operaio. In-16, 18 p. (7807)

Webber (E.). — Dizionario tecnico in quattro lingue. I. Italiano, tedesco, francese, inglese. Milan, U. Hoepli. In-16, XIV-351 p. (8651)

# LISTE DES ÉCHANGES AUTORISÉS

## ENTRE LES ANNALES DES MINES ET LES PUBLICATIONS FRANÇAISES ET ÉTRANGÈRES.

Les *Annales des Mines* ont été adressées, à titre d'échange, en 1896, aux Sociétés et publications dont les noms suivent :

1. — The Journal of the Franklin Institute. *Philadelphie.*
2. — The American Journal of science and arts. *New-Haven.*
3. — American philosophical Society. *Philadelphie.*
4. — Royal Society of London. *Londres.*
5. — The quarterly Journal of the Geological Society. *Londres.*
6. — Institution of civil Engineers. *Londres.*
7. — Royal Irish Academy. *Dublin.*
8. — Societa Toscana di Scienze naturali. *Pise.*
9. — L'Industria. Rivista tecnica ed economica illustrata. *Milan.*
10. — Société de physique et d'histoire naturelle de Genève.
11. — Société géologique de France. *Paris.*
12. — Journal de mathématiques pures et appliquées. *Paris.*
13. — Annales de Chimie et de Physique. *Paris.*
14. — Soc. d'encouragement pour l'industrie nationale. *Paris.*
15. — Journal de Pharmacie et de Chimie. *Paris.*
16. — Kaiserlich-Königliche Geologische Reichsanstalt. *Vienne.*
17. — Royal geological Society of Cornwall. *Penzance.*
18. — The Colliery Guardian and Journal of the Coal and Iron Trades. *Londres.*
19. — Royal Society of Edinburgh. *Édimbourg.*
20. — Société de l'industrie minérale. *Saint-Étienne.*
21. — Smithsonian Institution. *Washington.*
22. — Zeitschrift der deutschen geolog. Gesellschaft. *Berlin.*
23. — Jahresbericht über die Fortschritte der Chemie. *Brunswick.*
24. — Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur-und Architekten-Vereins. *Vienne.*
25. — Sociedad cientifica Argentina. *Buenos-Ayres.*
26. — Zeitschrift des Architekten und Ingenieur-Vereins zu Hannover. *Hanovre.*
27. — Geological Survey of India. *Calcutta.*

28. — Berg-und Hüttenmännische Zeitung. *Leipzig.*
29. — Société industrielle de Mulhouse.
30. — Société Chimique de Paris.
31. — Il Politecnico. Giornale dell' Ingegnere. Architetto civile ed industriale. *Milan.*
32. — Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. *Berlin.*
33. — Société des Ingénieurs civils. *Paris.*
34. — Bureau Central Météorologique de France. *Paris.*
35. — Boston Society of Natural History. *Boston.*
36. — Société linnéenne de Normandie. *Caen.*
37. — Comité géologique de la Russie. *St-Pétersbourg.*
38. — Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala. *Upsal.*
39. — Königliche Ungarische geologische Anstalt. *Buda-Pesth.*
40. — The Journal of the Iron and Steel Institute. *Londres.*
41. — The Engineering and Mining Journal. *New-York.*
42. — North of Englan Institute of Mining and Mechanical Engineers. *Newcastle-upon-Tyne.*
43. — Literary and Philosophical Society of Manchester.
44. — Berg-und Hüttenmännisches Jahrbuch der K. K. Bergakademien zu Leoben und Przibram und der Kön. Ungar. Bergakademie zu Schemnitz. *Vienne.*
45. — Oesterr. Zeitschrift für Berg-und Hüttenwesen. *Vienne.*
46. — Revue universelle des Mines et de la Métallurgie. *Liège.*
47. — American Institute of Mining Engineers. *Easton (Pensylvanie).*
48. — Reale Accademia dei Lincei. *Rome.*
49. — American chemical Society. *New-York.*
50. — Academy of natural Sciences of Philadelphia.
51. — Comision del Mapa geologigo de Espana. *Madrid.*
52. — Mémorial de l'Artillerie de la Marine. *Paris.*
53. — Midland Institute of mining, civil and mechanical Engineers. *Barnsley (Yorkshire).*
54. — L'Électricien, revue générale d'électricité. *Paris.*
55. — Giornale del Genio civile. *Rome.*
56. — Le Génie civil. *Paris.*
57. — Revista minera y metalurgica. *Madrid.*
58. — Annales de la Société géologique de Belgique. *Liège.*
59. — United States geological Survey. *Washington.*
60. — Institut royal géologique de Suède. *Stockholm.*
61. — Canadian institute. *Toronto.*
62. — Revue de la législation des mines. *Paris.*



63. — Section des travaux géologiques du Portugal. *Lisbonne.*
64. — Second geological survey of Pennsylvania. *Philadelphie.*
65. — K. K. Naturhistorischer Hofmuseum. *Vienne.*
66. — College of Science, Imperial University, Japon. *Tokyo.*
67. — Kais. Leopoldinisch-Carolinische deutsche Akademie der Naturforscher. *Halle-sur-Saale.*
68. — Annales de la Faculté des sciences de Toulouse.
69. — New-York Akademy of sciences. *New-York.*
70. — Institution of Mechanical Engineers. *Londres.*
71. — Department of Mines of Victoria. *Melbourne.*
72. — Department of Mines of New South Wales. *Sydney.*
73. — Revue générale des sciences pures et appliquées. *Paris.*
74. — The Shool of Mines Quarterly. *New-York.*
75. — Geological and Natural History Survey of Canada. *Ottawa.*
76. — La Réforme sociale. *Paris.*
77. — Société internationale des Électriciens. *Paris.*
78. — Bulletin of the Geological Society of America. *Rochester (N.-Y.).*
79. — Commission internationale du Congrès des chemins de fer. *Bruxelles.*
80. — Association amicale des élèves de l'École supérieure des mines. *Paris.*
81. — Zeitschrift für praktische Geologie. *Berlin.*
82. — The Journal of Geology, University of Chicago.
83. — Bulletin of the Department of Geology, University of California. *Berkeley.*
84. — Bulletin de l'Association des ingénieurs-électriciens sortis de l'Institut électro-technique Montefiore. *Liège.*
85. — Société Belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie. *Bruxelles.*
86. — La Revue Technique. *Paris.*
87. — American Museum of Natural History. *New-York.*
88. — Journal of the Society of chemical Industry. *Londres.*
89. — Bulletin technologique de la Société des anciens élèves des écoles nationales d'Arts et Métiers. *Paris.*

# TABLE DES MATIÈRES

## DU TOME DIXIÈME.

### MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

Pages.

Applications géologiques de la spéléologie. — Origine et rôle des cavernes; leurs variations climatériques; leurs rapports avec les filons; par M. *E.-A. Martel* . . . . . 5

Sur les variations observées dans la composition des apatites, des phosphorites et des phosphates sédimentaires. — Remarques sur le gisement et le mode de formation de ces phosphates; par M. *Adolphe Carnot*. . . . . 137

### EXPLOITATION DES MINES. — GÎTES MINÉRAUX.

Commission du grisou. — Accidents survenus par suite d'explosion tardive de cartouches de grisounite.

I. — Rapport présenté à la Commission; par M. *Sarrau*. . . . . 126

II. — Avis de la Commission du grisou. . . . . 131

Note sur les dégagements instantanés de grisou; par M. *Frédéric Delafond*. . . . . 653

### MÉCANIQUE. — MACHINES.

Pompes sans piston à transmission pneumatique; par M. *de Montrichard*. . . . . 101

Sur un mode particulier d'avaries le long des rivures de chaudières; par M. *C. Walckenaer*. . . . . 367



Pages.

Régulateurs. Organes de réglage et volants des machines. — Théorie de la corrélation de ces appareils entre eux; par M. *Georges Marié*. . . . . 391

—— *Suite et fin* . . . . . 497

Bulletin des accidents d'appareils à vapeur survenus pendant l'année 1895. . . . . 632

### CHEMINS DE FER.

Théorie de la stabilité des locomotives (Seconde partie); par M. *J. Nadal* (*) . . . . . 232

—— *Suite et fin* . . . . . 291

### OBJETS DIVERS.

Discours prononcé à l'occasion de la mort de M. Amé-Henry Resal, inspecteur général des mines, membre de l'Académie des Sciences; par M. *Maurice Lévy*. . . . . 625

### BULLETIN.

Statistique de l'industrie minérale de l'Espagne en 1894..... 133

Statistique de l'industrie minérale et métallurgique de l'Autriche en 1894 ..... 135

Production du pétrole et de l'ozokérite en Galicie pendant l'année 1894 ..... 136

Statistique du zinc et du plomb en Europe pour l'année 1894..... 289

Statistique de l'industrie minérale des États-Unis en 1894 et en 1895 387

Statistique de l'industrie minérale du Canada en 1895 ..... 389

Statistique de l'industrie minérale de la Norvège pour les années 1891, 1892 et 1893..... 390

Statistique de l'industrie minérale de la Hongrie en 1894 et en 1895. 495

La Collection des gîtes minéraux et métallifères à l'École supérieure des Mines; par M. *L. de Launay* ..... 570

Statistique de l'industrie minérale de la Bavière en 1895..... 621

Production minérale et métallurgique des Iles-Britanniques pendant l'année 1895..... 621

(*) Pour la première partie du travail, voir le tome IX, p. 413.

Pages.

Actes de courage et de dévouement : accidents arrivés dans les mines et carrières ..... 670
Statistique de l'industrie minérale de la Belgique en 1895..... 672

BIBLIOGRAPHIE.

*Deuxième semestre de* 1896.

Ouvrages français ..... 679
Ouvrages anglais..... 695
Ouvrages américains ..... 702
Ouvrages suisses..... 703
Ouvrages allemands..... 703
Ouvrages italiens..... 710

Liste des échanges autorisés entre les *Annales des Mines* et les publications françaises et étrangères ..... 721



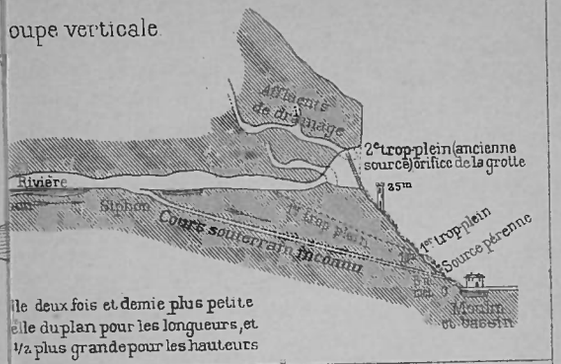
# EXPLICATION DES PLANCHES

## DU TOME DIXIÈME.

Pl. I à III. — Applications géologiques de la spéléologie.
Pl. IV à VI. — Théorie de la stabilité des locomotives.
Pl. VII à X. — Régulateurs : théorie de la corrélation entre les organes de réglage et les volants des machines.
Pl. XI et XII. — Accidents d'appareils à vapeur survenus pendant l'année 1895.

Tours. — Imprimerie Deslis Frères.

Fig. 4. Source à tropplein de St Géry

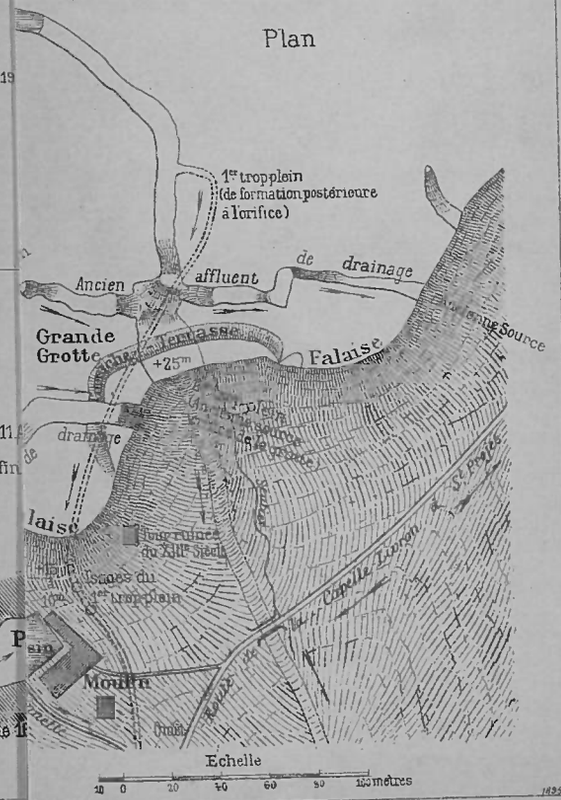



ile deux fois et demie plus petite
elle du plan pour les longueurs, et
1/2 plus grande pour les hauteurs

3 et 4. Grotte de Saint-Géry (ou Chély)

Fig. 3. Source à tropplein de la Bonnette entre Limogne et Caylus (Tarn et Garonne)
Développement total 700 mètres

Plan




Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

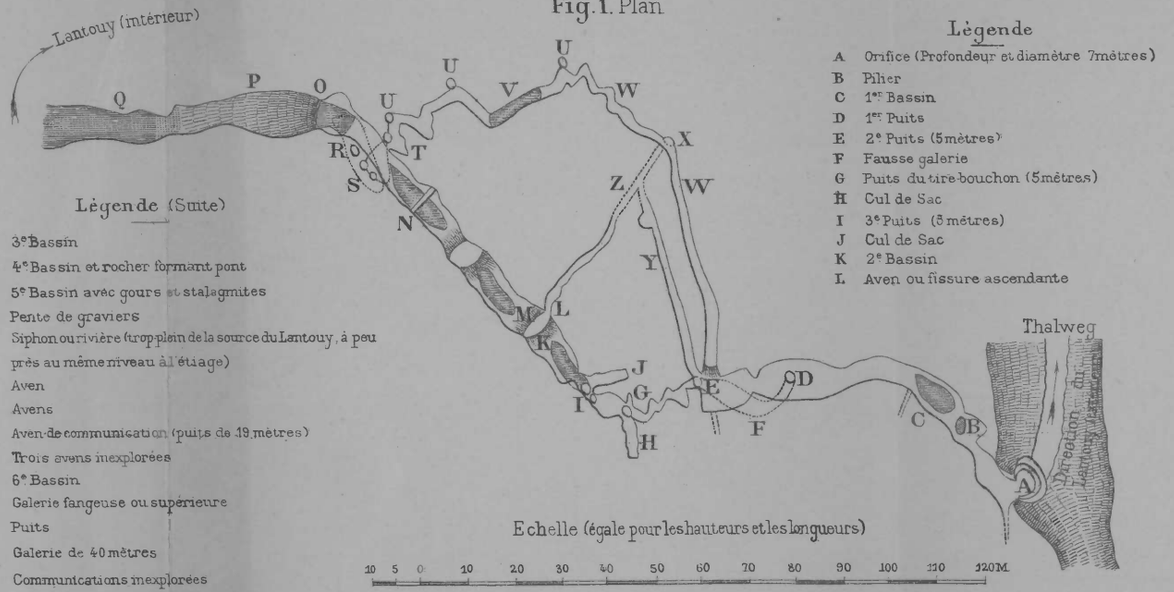
## Fig. 1 et 2. Source intermittente temporaire de l'Oule

entre Cajarc et Limogne (Lot.)

explorée en 1894 et 1895 par MMrs Pradinés, Aymard, Martel, Rupin, Lalande et Pons

Développement total des galeries reconnues 500 mètres

### Fig. 1. Plan



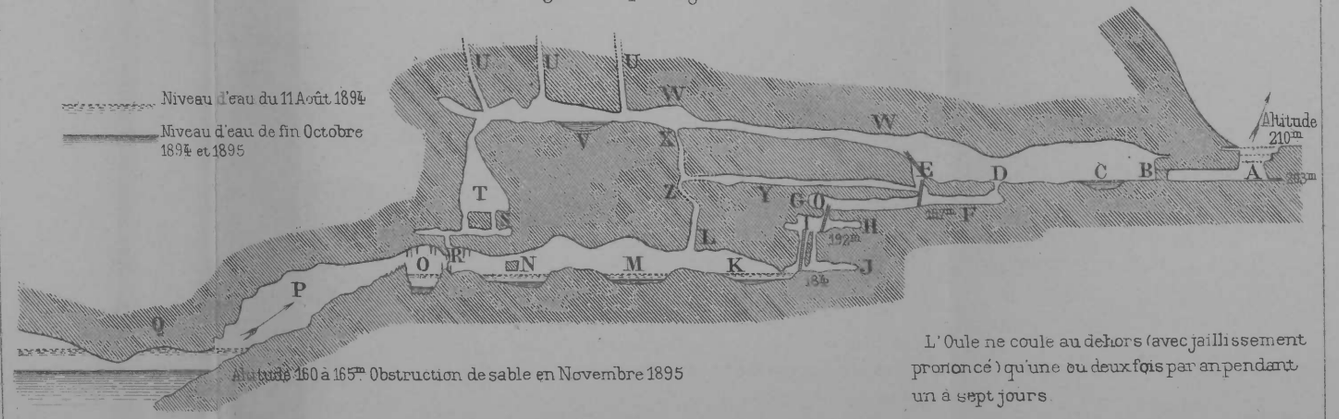

Légende

A Orifice (Profondeur et diamètre 7 mètres)
B Pilier
C 1er Bassin
D 1er Puits
E 2e Puits (5 mètres)
F Fausse galerie
G Puits du tire-bouchon (5 mètres)
H Cul de Sac
I 3e Puits (5 mètres)
J Cul de Sac
K 2e Bassin
L Aven ou fissure ascendante

Légende (Suite)

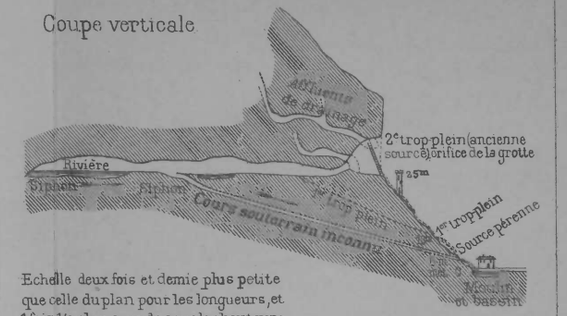
M 3e Bassin
N 4e Bassin et rocher formant pont
O 5e Bassin avec gours et stalagmites
P Pente de graviers
Q Siphon ou rivière (trop plein de la source du Lantouy, à peu près au même niveau à l'étiage)
R Aven
S Avens
T Aven de communication (puits de 19 mètres)
U Trois avens inexplorées
V 6e Bassin
W Galerie fangeuse ou supérieure
X Puits
Y Galerie de 40 mètres
Z Communications inexplorées

### Fig. 2. Coupe longitudinale




L'Oule ne coule au dehors (avec jaillissement prononcé) qu'une ou deux fois par an pendant un à sept jours.

## Fig. 4. Source à trop plein de St Géry




Echelle deux fois et demie plus petite que celle du plan pour les longueurs, et 1 fois 1/2 plus grande pour les hauteurs

## Fig. 3 et 4. Grotte de Saint-Géry (ou Chély)

### Fig. 3. Source à trop plein de la Bonnette

entre Limogne et Caylus (Tarn et Garonne)

Développement total 700 mètres

Plan






Auto-imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

**Fig. 1.** Cours souterrain de la rivière de Gort (Comté de Galway, Irlande)

Coupe longitudinale

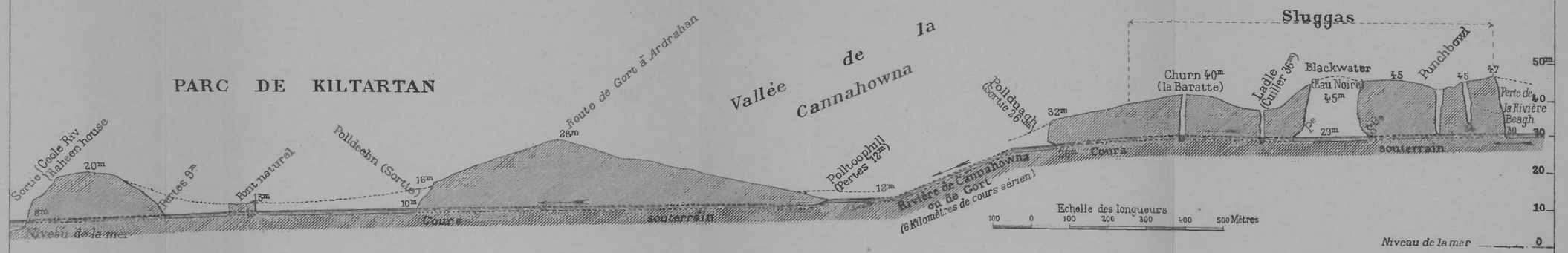
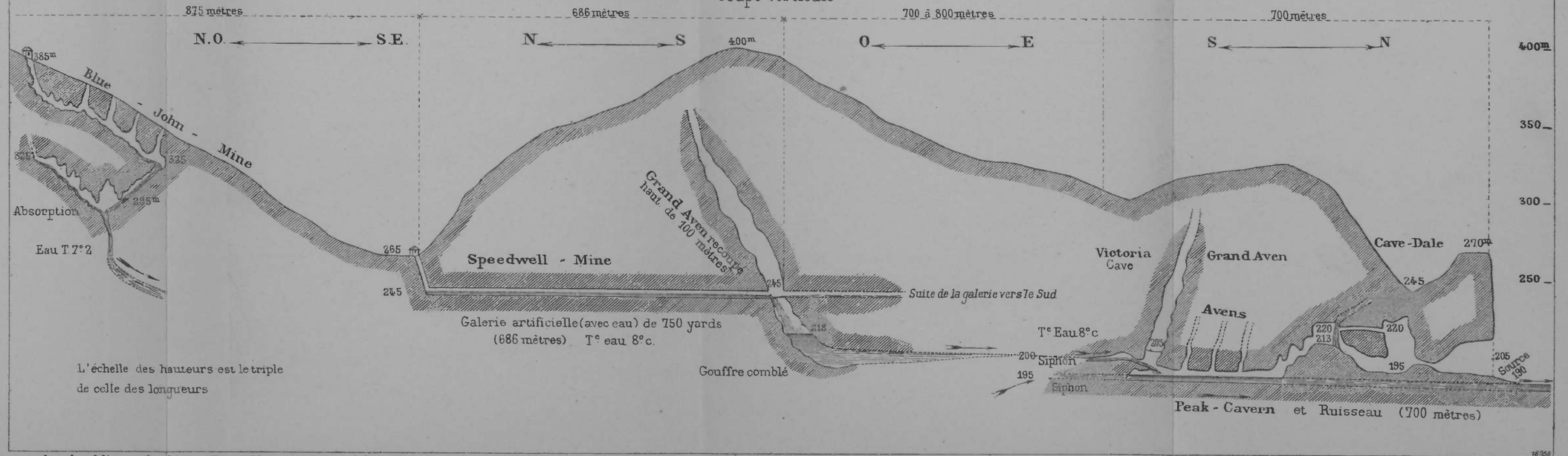



**Fig. 2.** Situation relative des trois grandes cavernes de Castleton

Coupe verticale




Annales des Mines. 9e Série. Tome X, pages 5 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1 et 2. Peak Cavern, Devil s Hole, Trou du Diable à Castleton (Derbyshire)

Fig. 1. Plan

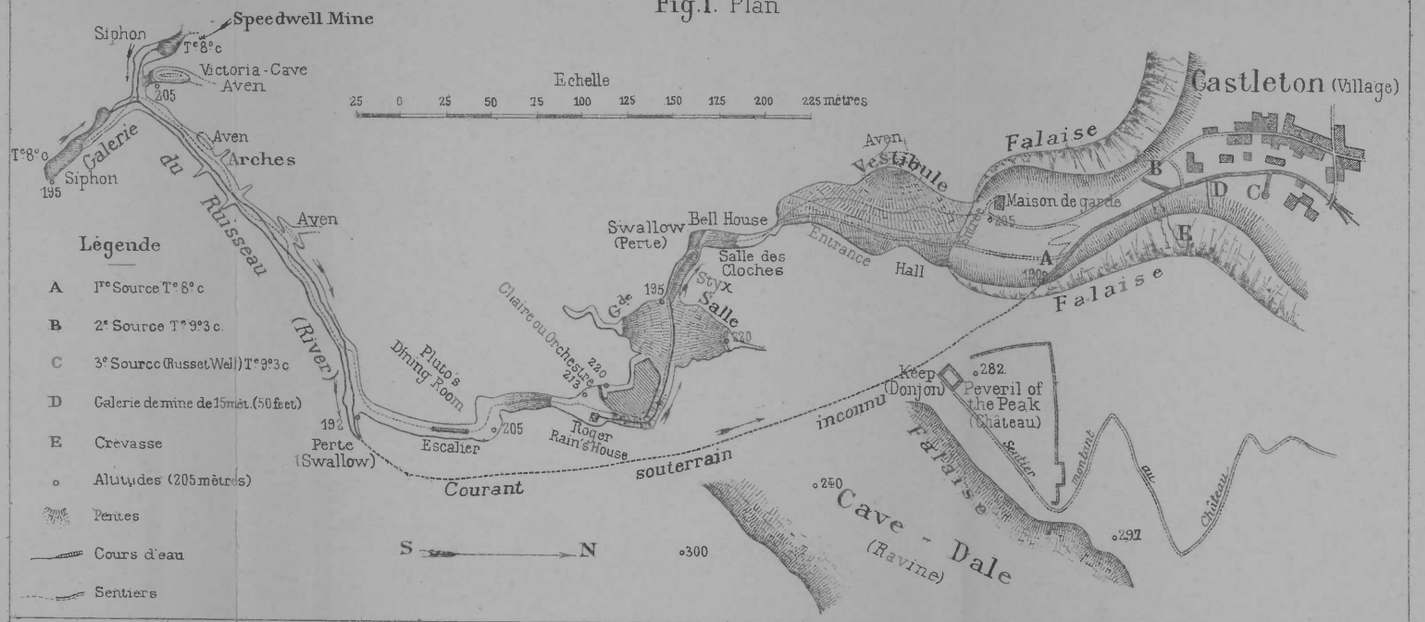



Fig. 3 et 4. Blue John Mine à Castleton (Derbyshire)

Levé sommaire et partiel

Fig. 4. Coupe

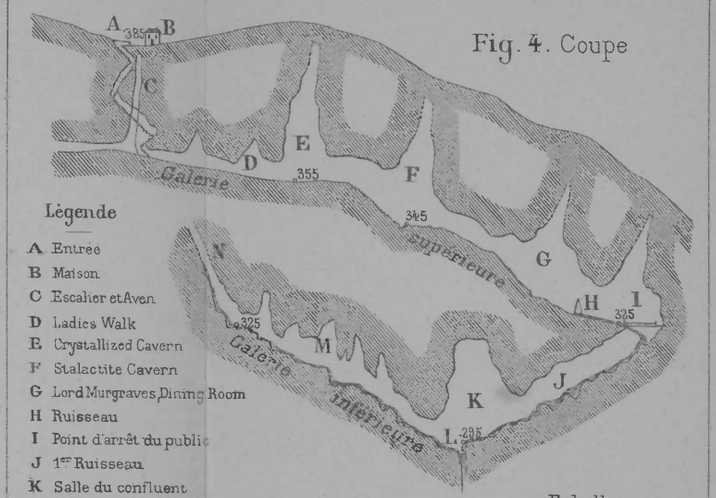



Fig. 2. Coupe

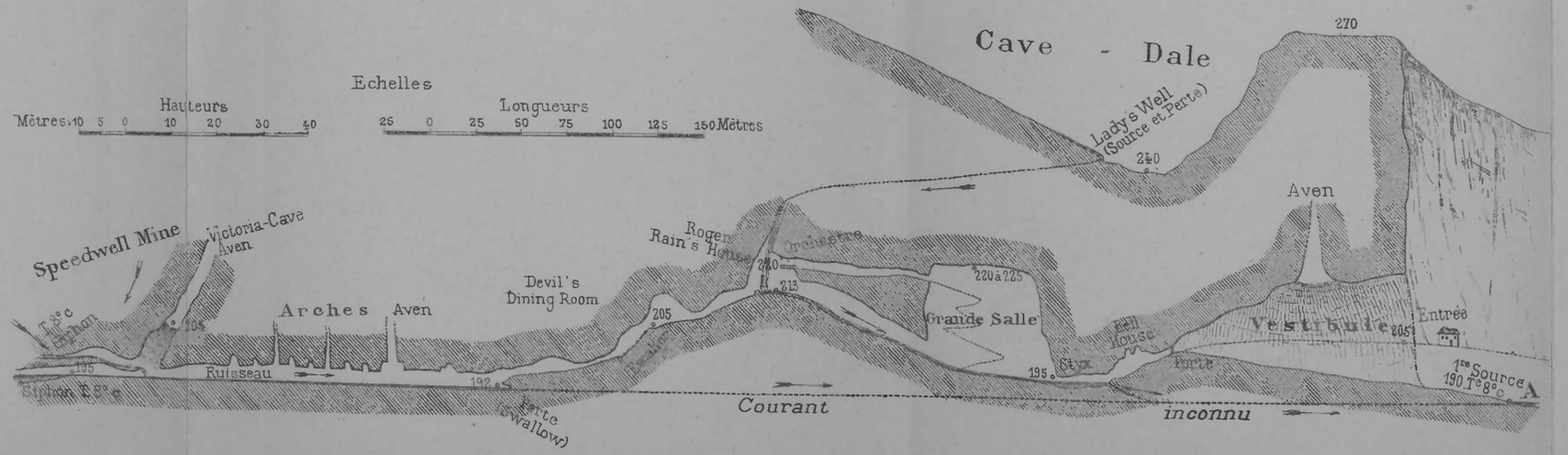
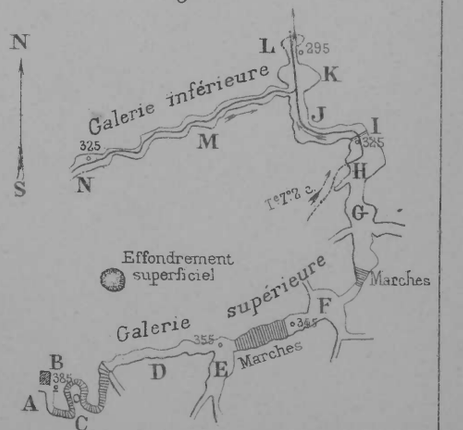



Fig. 3. Plan




Annales des Mines. 9e Série. Tome X, pages 5 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1.

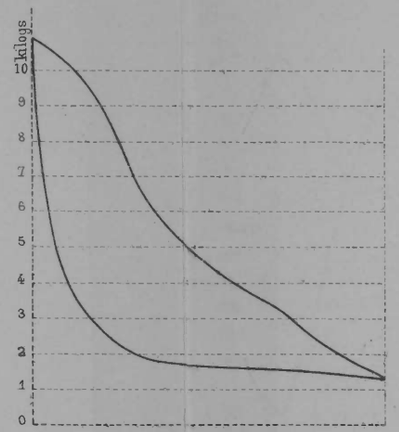



Fig. 2.

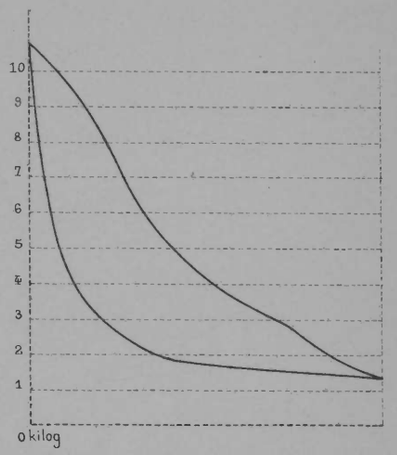



Fig. 3

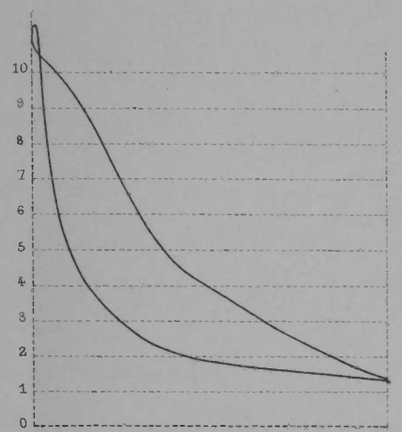



Fig. 4

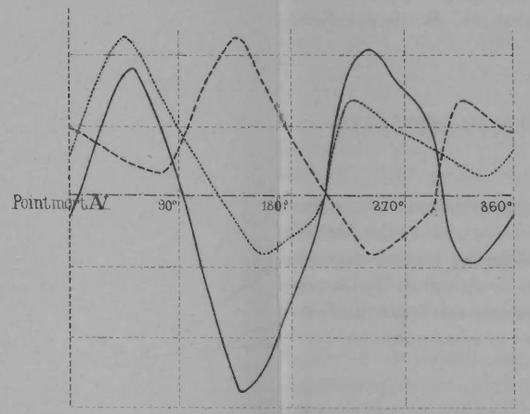



Fig. 9.

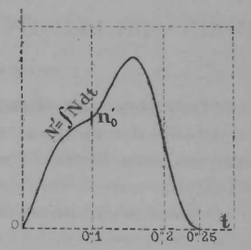



Fig. 5.

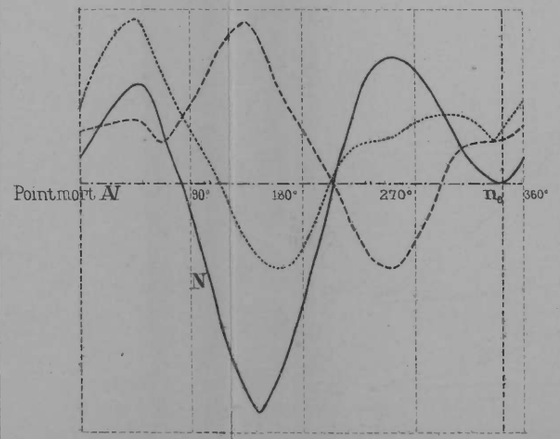



Fig. 6

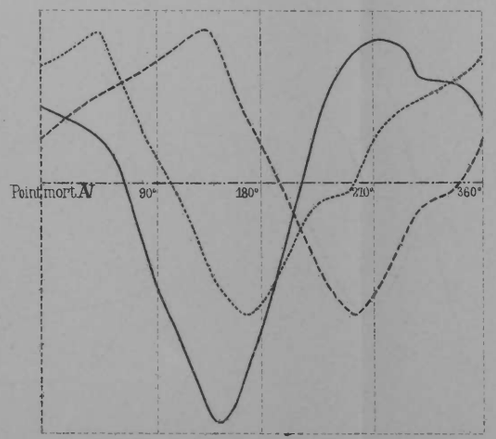



Fig. 7

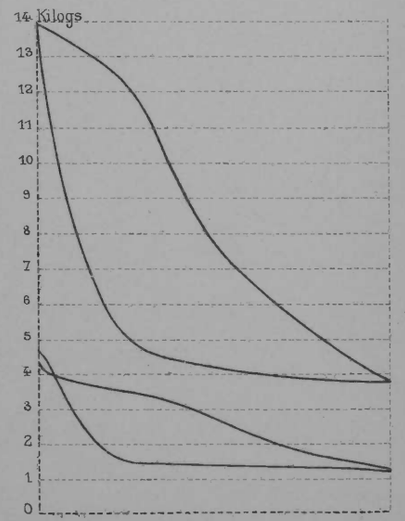
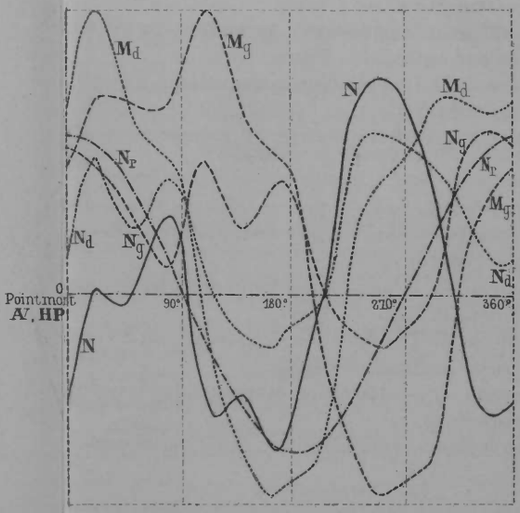



Fig. 8.




Annales des Mines, 9e Série. Tome X, pages 232 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1.

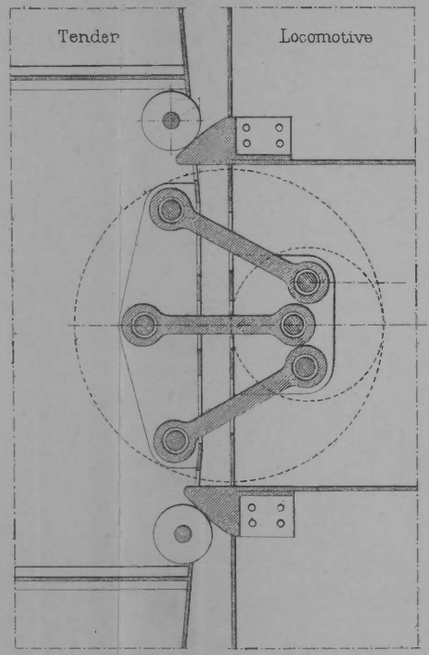



Fig. 2.

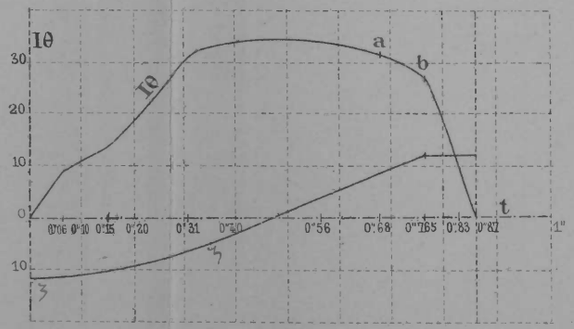
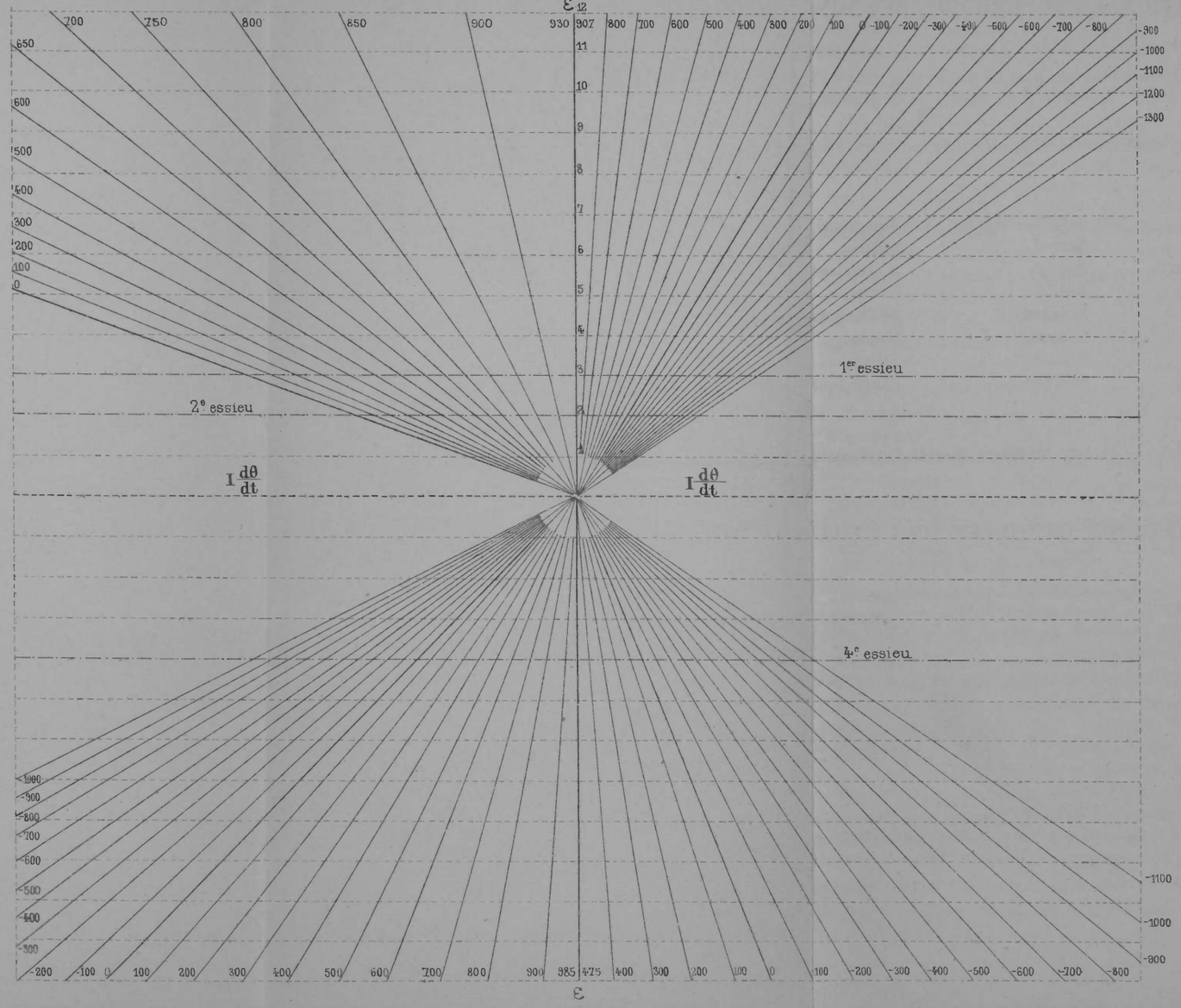



Fig. 3.




Annales des Mines, 9e Série. Tome X, pages 291 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1.

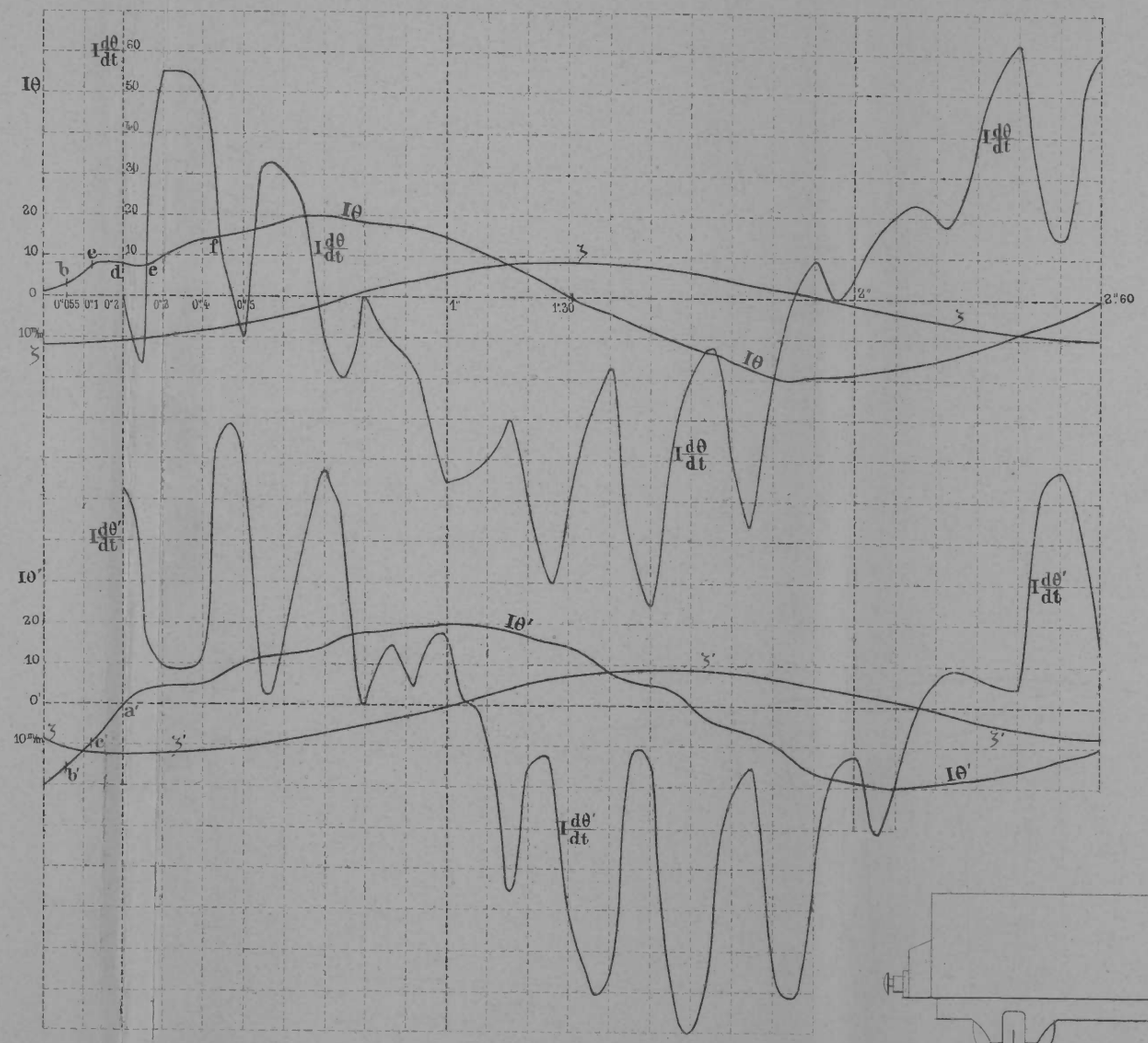



Fig. 2

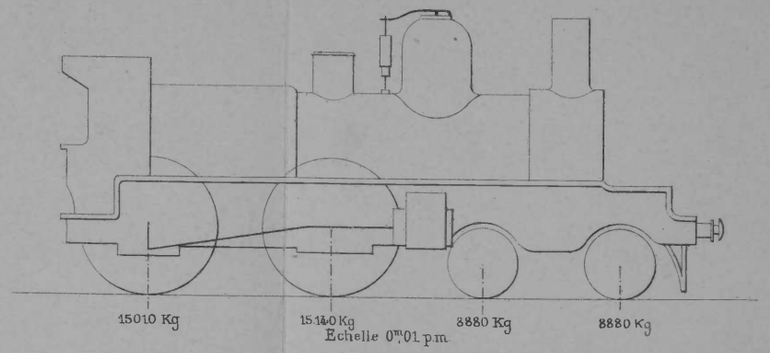



Fig. 3.

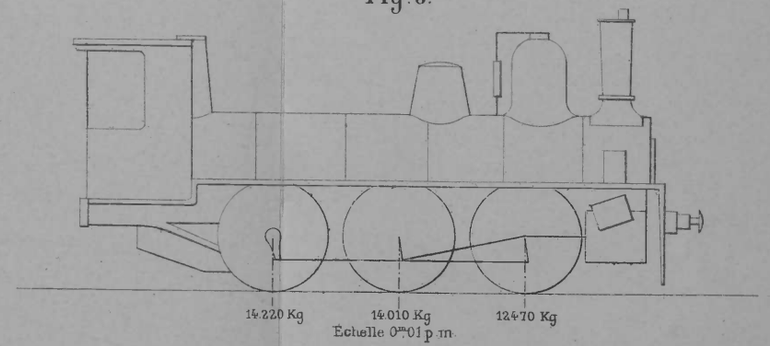
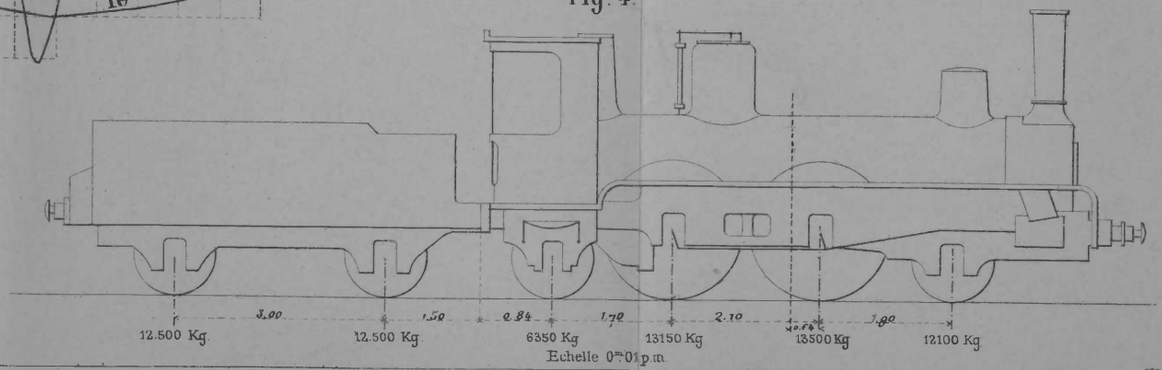



Fig. 4.




Annales des Mines, 9e Série. Tome X, pages 291 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1.

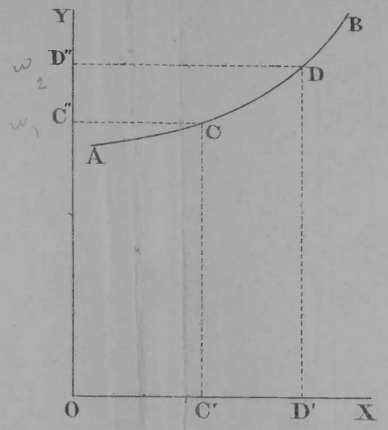



Fig. 2

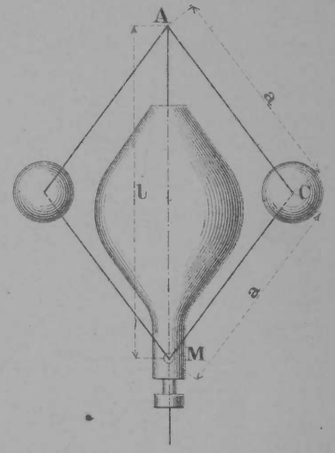



Fig. 3

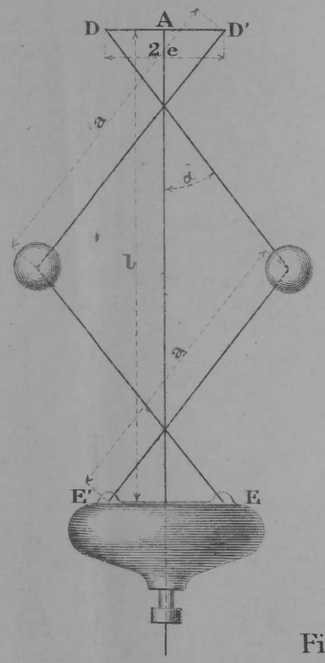



Fig. 8.

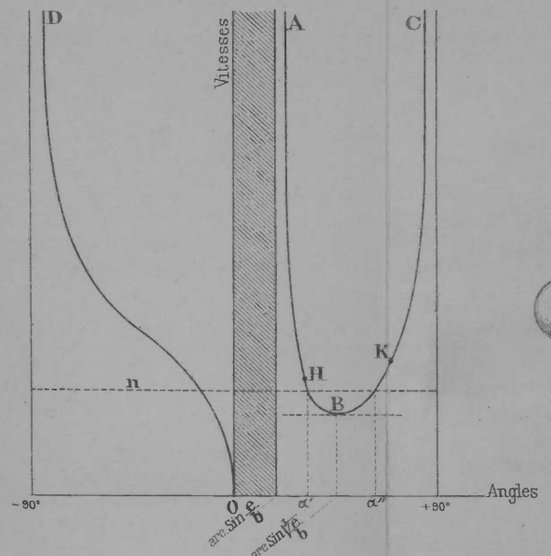



Fig. 9.

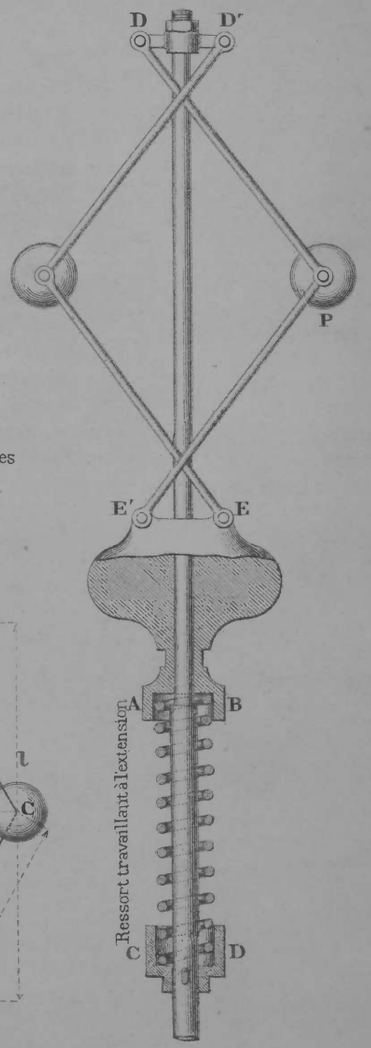



Fig. 4.

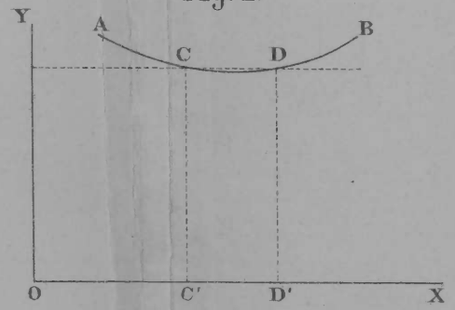



Fig. 5

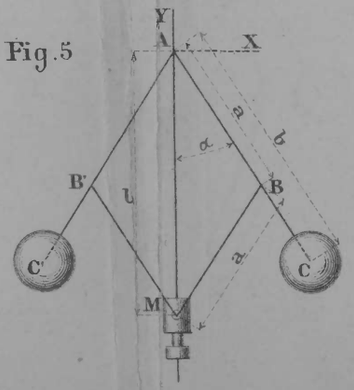



Fig. 6.

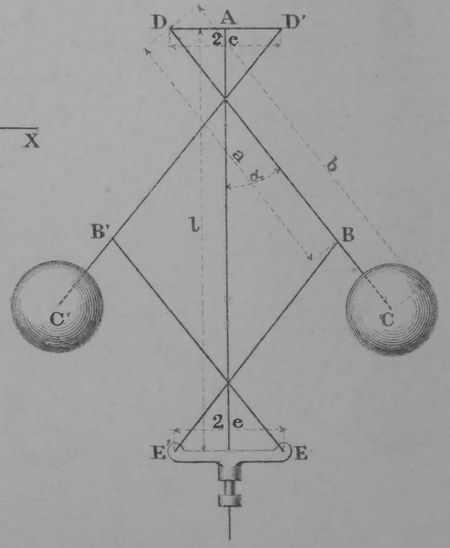



Fig. 7.

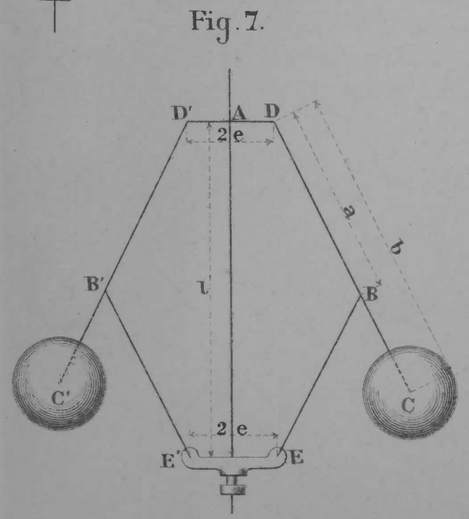
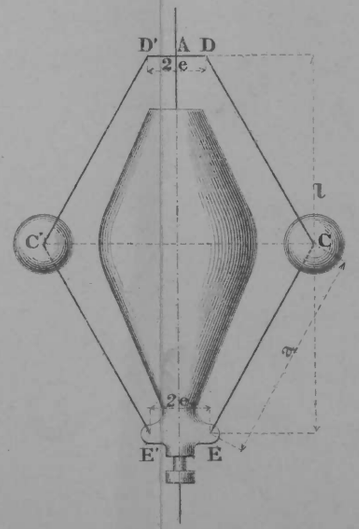



Fig. 10




Annales des Mines. 9e Série. Tome X, pages 391 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1.

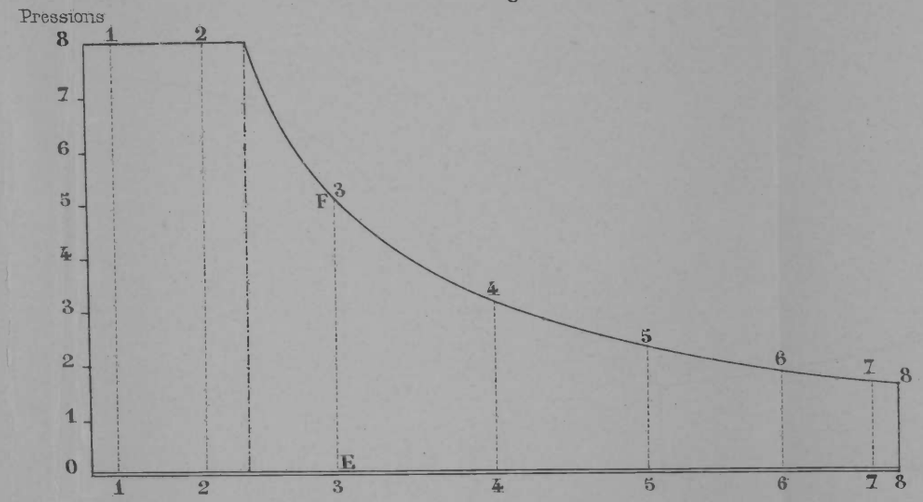



Fig. 2.

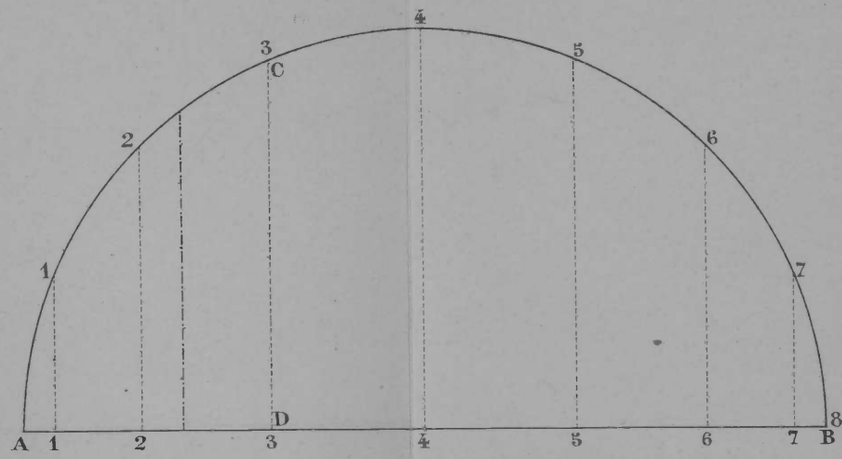
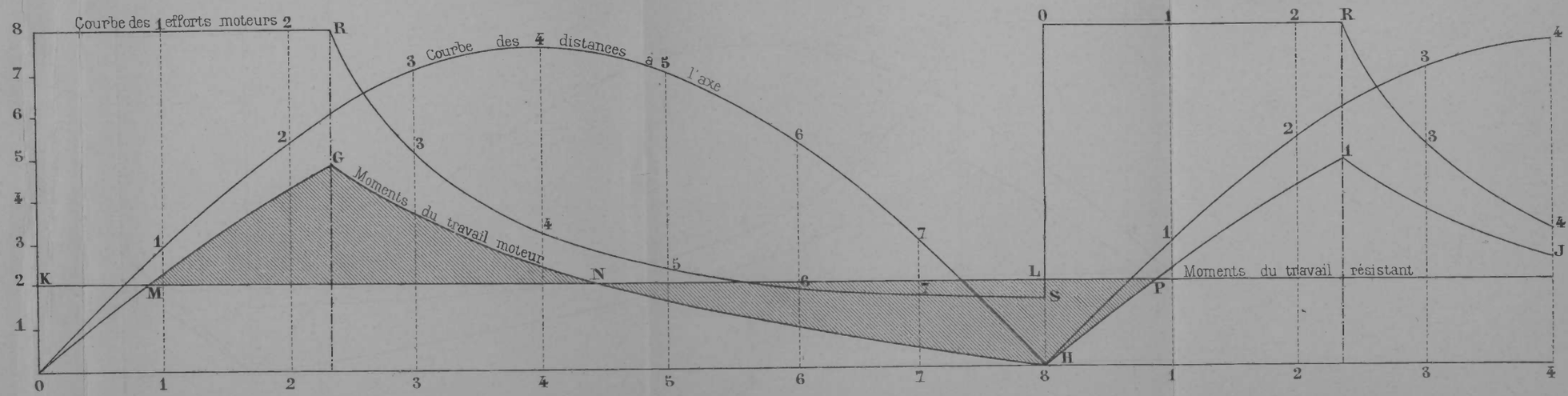



Fig. 3.




Annales des Mines. 9e Série. Tome X, pages 391 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1

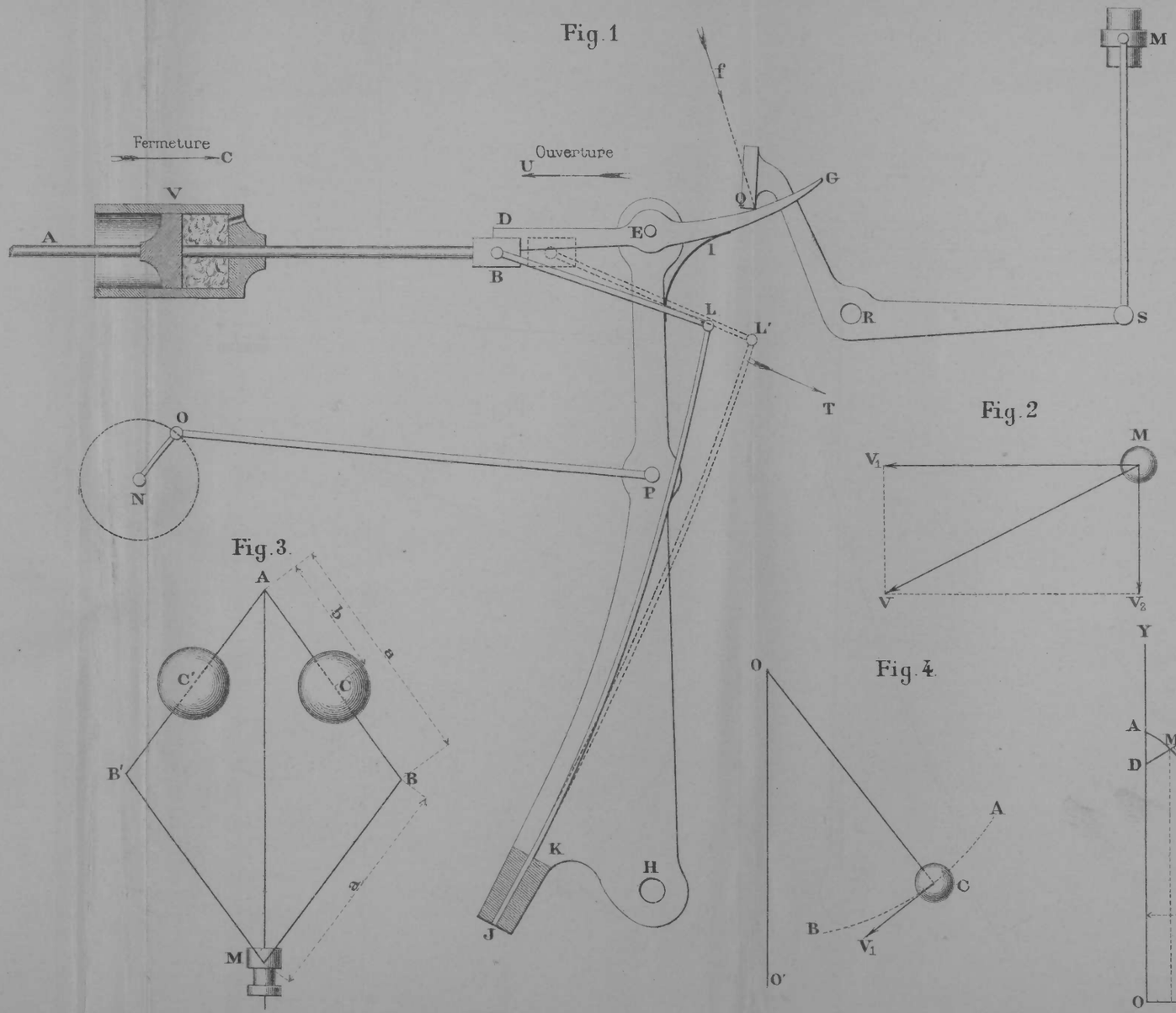



Fig. 2




Fig. 3.




Fig. 4.




Fig. 5.

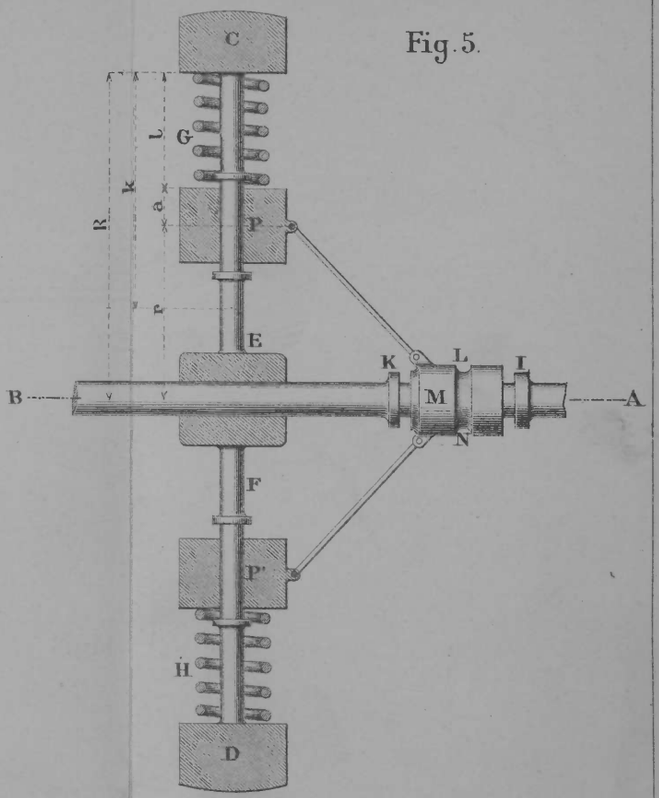
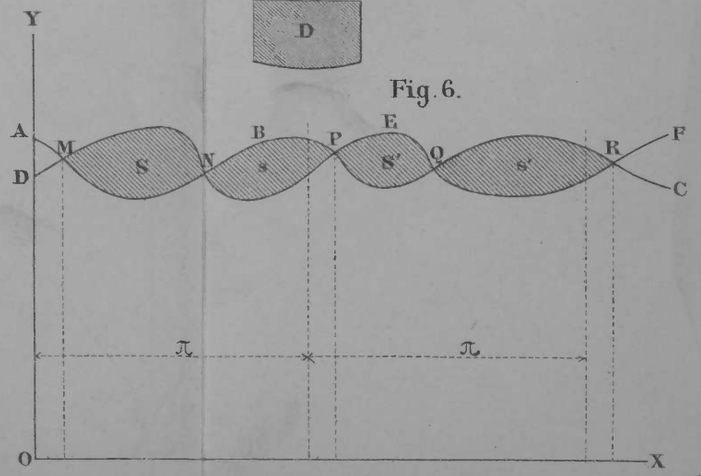



Fig. 6.




Annales des Mines. 9e Série. Tome X, pages 391 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

Fig. 1.

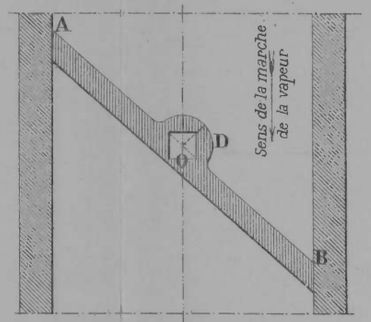



Fig. 3.

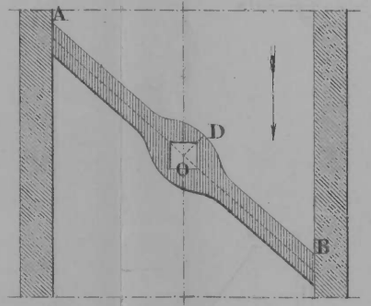



Fig. 4.

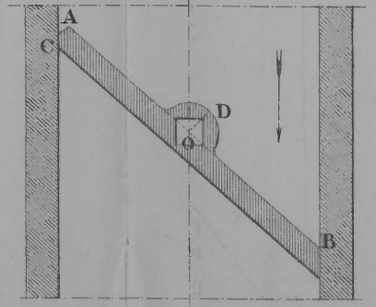



Fig. 2.

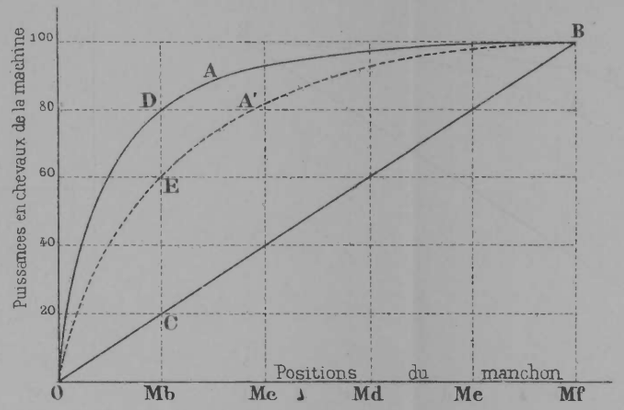



Fig. 5.

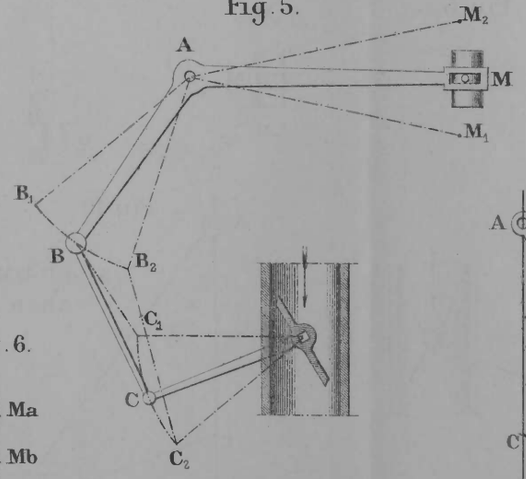



Fig. 6.

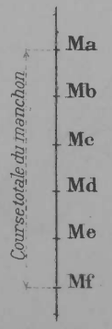



Fig. 7.

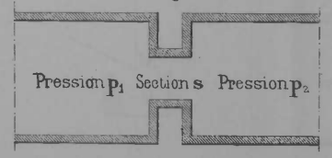



Fig. 8.

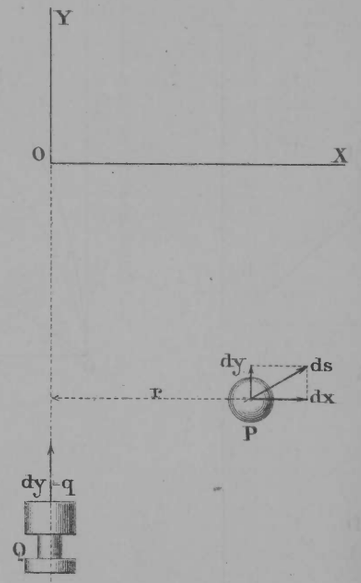



Fig. 9.

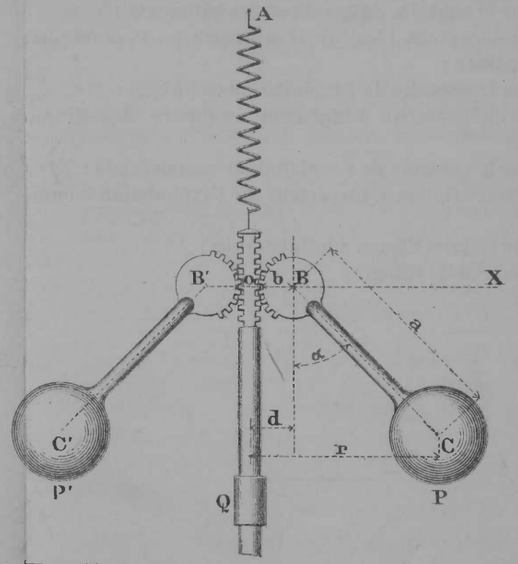



Fig. 10

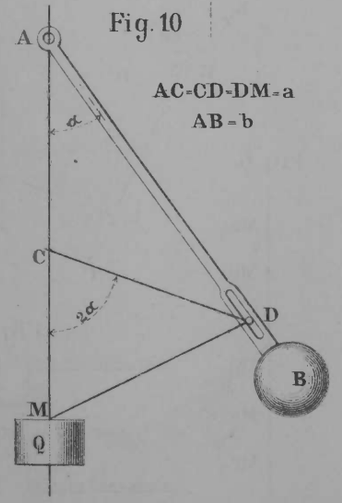



Fig. 11.

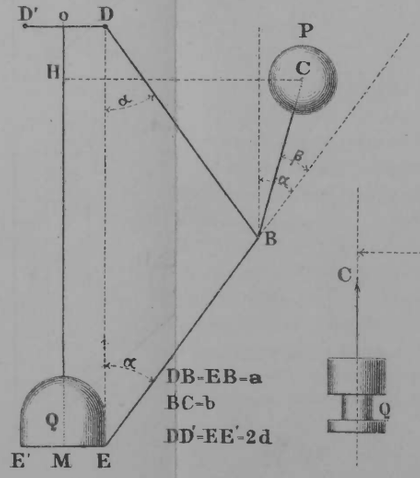
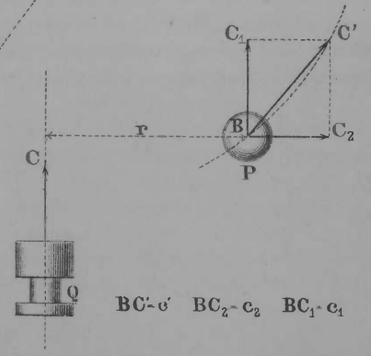



Fig. 12






Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

**Fig. 1.** Ouverture d'un tube bouilleur par suite de surchauffe *(2 Janvier)*

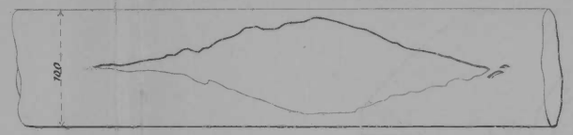


**Fig. 2.** Tamponnage vicieux d'un trou de plaque tubulaire *(9 Janvier)*

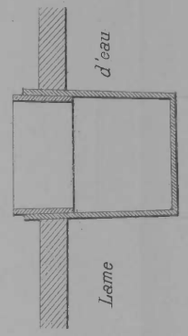



**Fig. 3.** Vue perspective d'une partie de paroi cylindrique en fonte, rompue circulairement au voisinage d'une bride intérieure servant à l'assemblage d'un fond *(16 Janvier)*

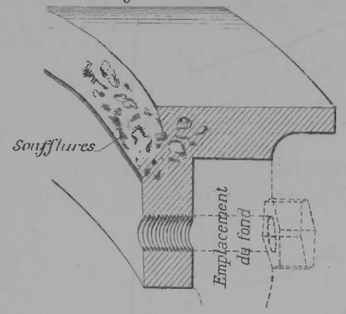



**Fig. 4.** Forme défectueuse d'un fond en fonte

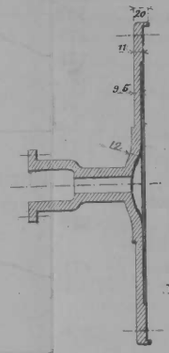


**Fig. 5.** Rupture du fond représenté **Fig. 4.** *(21 Janvier)*

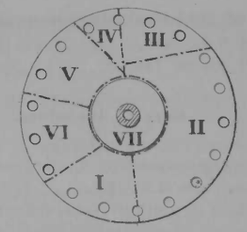



**Fig. 6.** Ouverture d'un tube bouilleur par suite de surchauffe *(26 Janvier)*



**Fig. 7.** Formes et dispositions défectueuses de la partie arrière d'une chaudière à foyer amovible

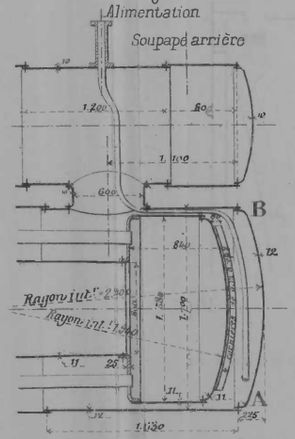



**Fig. 9.** Forme et assemblage défectueux d'un fond en tôle de fer

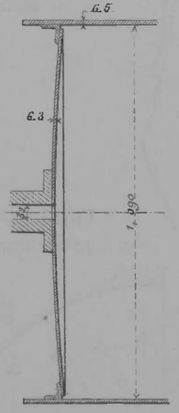


**Fig. 10.** Rupture et déformation du fond représenté **Fig. 9.** *(11 Février)*

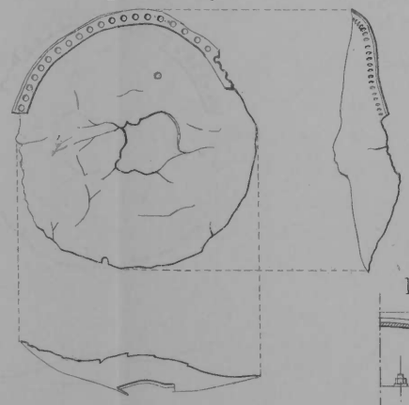


**Fig. 11.** Disposition d'une paroi cylindrique en fonte avec bride intérieure servant à l'assemblage d'un fond

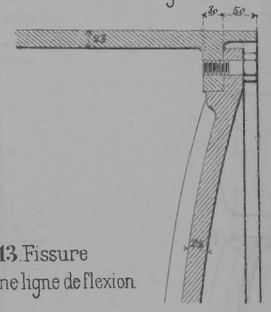


**Fig. 12.** Vue et Coupes d'un fragment de la paroi cylindrique de la **Fig. 11** avec retirures de fonte à la base de la bride intérieure *(6 Mars)*

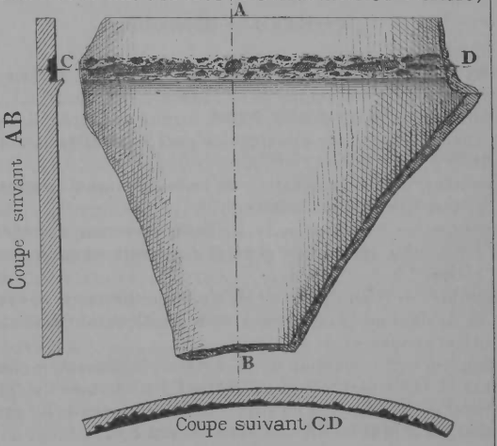



**Fig. 8.** Corrosions et rupture circulaire du fond AB de la **Fig. 7.** *(8 Février)*

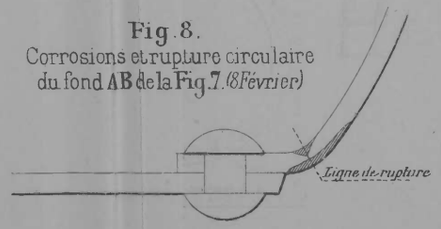



**Fig. 13.** Fissure le long d'une ligne de flexion

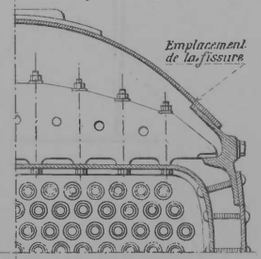



**Fig. 14.** Explosion d'un réchauffeur corrodé *(4 Avril)*

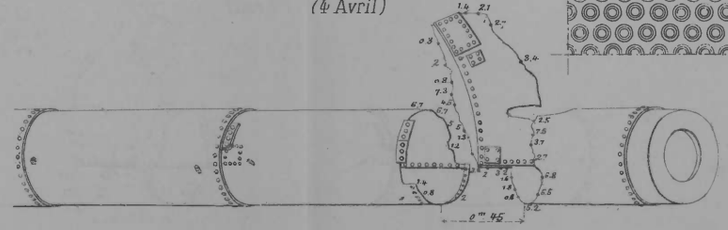
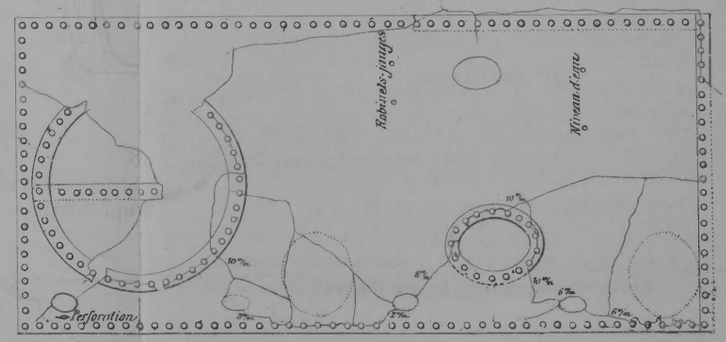


**Fig. 15.** Fragmentation d'un corps vertical de chaudière, vieux et corrodé *(6 Mai)*






Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.

**Fig. 2.** Coupe de l'installation représentée Fig. 1.

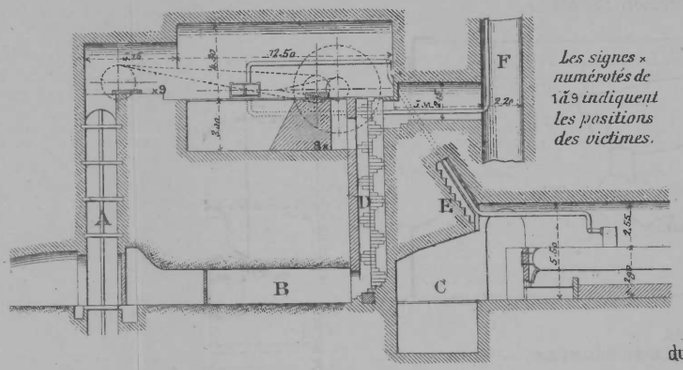
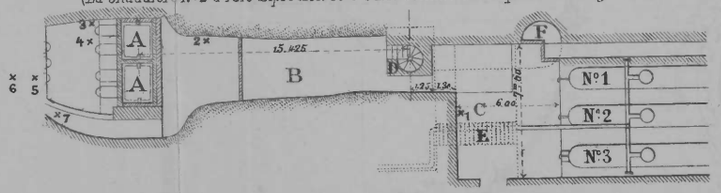



**Fig. 1.** Plan d'une installation souterraine de chaudières, susceptible de rendre un accident particulièrement désastreux.
*(La chaudière N°2 a fait explosion le 5 Juin comme l'indiquent les Fig. 3, 4 et 5)*



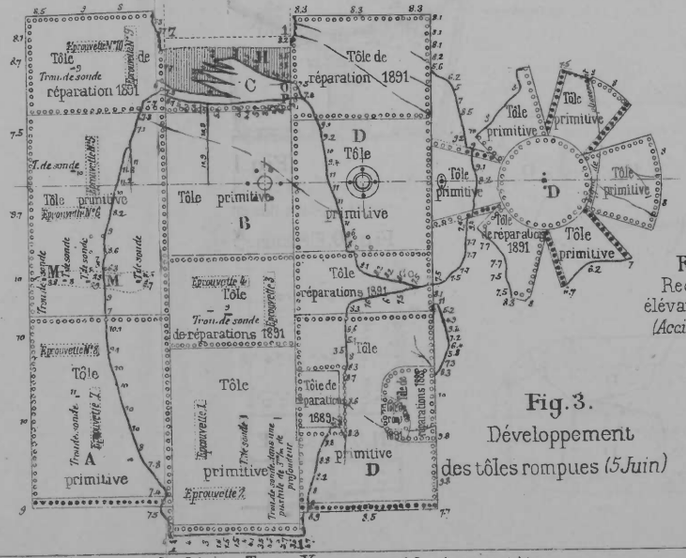




**Fig. 3.** Développement des tôles rompues *(5 Juin)*

**Fig. 6.**
Fragmentation d'un foyer par suite de corrosion et d'excès de pression *(13 Juillet)*

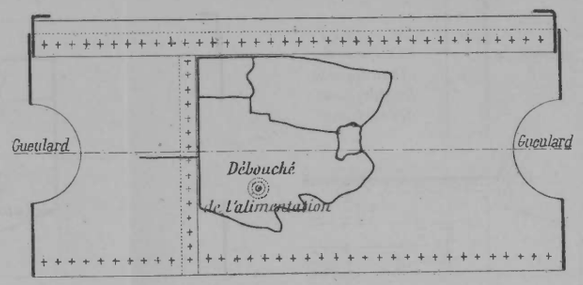



**Fig. 13.** Cassures entre rivets du raccordement d'un corps cylindrique avec une plaque tubulaire plane *(15 Octobre)*

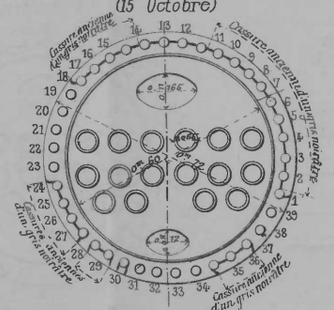


**Fig. 5.**
Génératrice supérieure

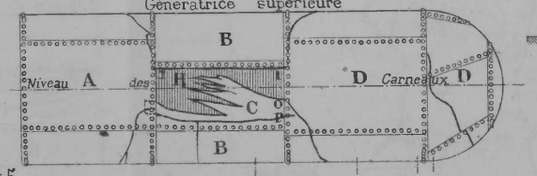



**Fig. 4** et **5.**
Reconstitution élévations latérales.
*(Accident du 5 Juin)*

**Fig. 4.**
Génératrice supérieure

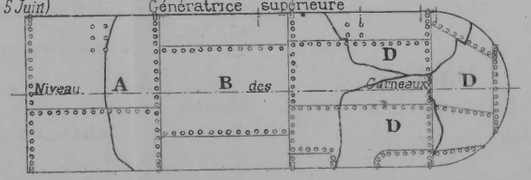



**Fig. 7 et 8.**
Explosion d'un corps cylindrique par suite de corrosion *(2 Août)*

**Fig. 7.** Elévation

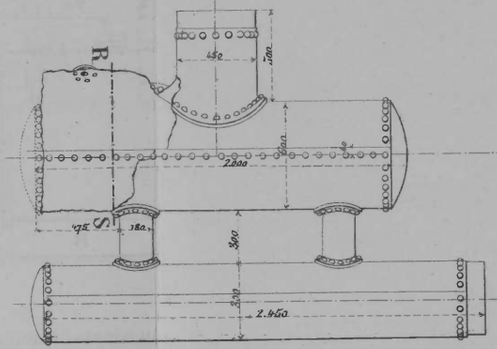



**Fig. 8.** Coupe RS

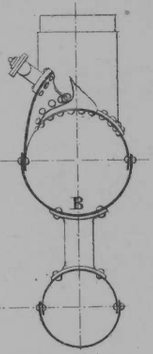
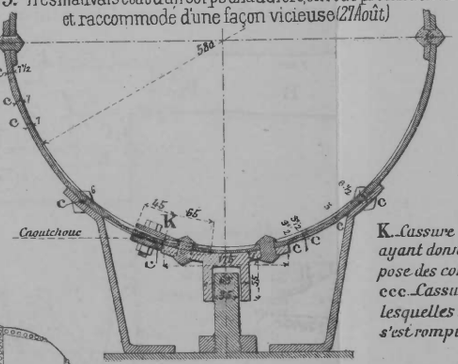



**Fig. 9.** Très mauvais état d'un corps chaudière, corrodé profondément et raccommodé d'une façon vicieuse *(27 Août)*




K. *Cassure ancienne ayant donné lieu à la pose des contreplaques* ccc. *Cassures suivant lesquelles la chaudière s'est rompue.*

**Fig. 14.** Assemblage défectueux d'un fond en fonte avec une virole en cuivre *(23 Octobre)*

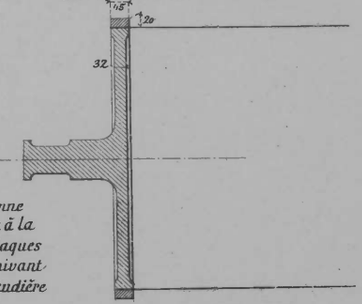


**Fig. 10, 11 et 12.**
Déchirures d'une face plane d'enveloppe de foyer par suite d'usure des entretoises *(5 Septembre)*

**Fig. 10.** Elévation

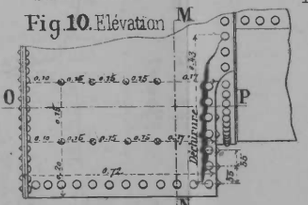



**Fig. 11.** Coupe suivant OP

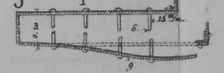


**Fig. 12.**
Coupe suivant MN

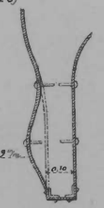
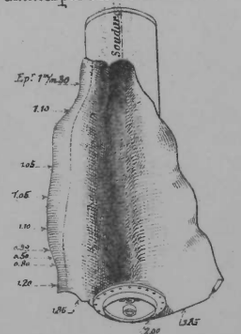


**Fig. 15.**
Déchirure d'un cylindre de cuivre aminci par l'usure *(2 Novembre)*




Annales des Mines, 9e Série. Tome X, pages 632 et suivantes.

Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.